

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Systém napájení měřících přístrojů z okolního prostředí**  
**Power Supply of Measurement Equipments from Surround –**  
**Energy Harvesting**

**2018**

**Vojtěch Šotola**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vojtěch Šotola**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612R041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Systém napájení měřicích přístrojů z okolního prostředí**  
**Power Supply of Measurement Equipments from Surround**  
**- Energy Harvesting**

Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky základních principů a způsobů získávání energie z okolí.
2. Návrh variant systémů napájení měřicích přístrojů.
3. Realizace variant systémů napájení měřicích přístrojů z okolního prostředí.
4. Verifikace a optimalizace systémů napájení měřicích přístrojů z okolního prostředí.
5. Srovnání naměřených výsledků s teoretickými předpoklady.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [2] BRTNÍK, Bohumil. *Základní elektronické obvody*. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-408-8.
- [3] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž - SMT a SMD*. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-181-0.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Elektronická kniha ve formátu PDF na CD ROM. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-299-2.
- [5] *Thermoelectrics and its Energy Harvesting, 2-Volume Set*. ROWE, D. M., ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1596931091.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D.**

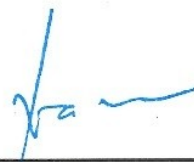
Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



---

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2018

.....  
podpis studenta

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňku Macháčkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Děkuji také Bc. Vilémovi Heczkovi za pomoc při výrobě přípravku na CNC frézce.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem napájení systému z okolního prostředí. Popisuje zjištění všech potřebných informací pro návrh a pokračuje až po návrh samotných elementů napáječe. Práce popisuje jednotlivé možnosti získání energie z okolí. Jsou zmíněna i jednotlivá uspořádání možných elementů, aby bylo zajištěno optimální řešení celého systému.

Práce dále okrajově popisuje návrh převodníku proudu na napětí, který je potřebný pro zjištění parametrů spotřebiče.

## **Klíčová slova**

Energy harvesting; DC/DC měnič; termočlánek; nízké teplotní rozdíly; solární článek; bez baterie.

## **Abstract**

The thesis deals with design of the system gaining energy from the environment. It describes the finding of all the necessary information for the design and continues until the design of individual elements. The thesis describes individual possibilities of obtaining energy from the environment. There are also mentioned the various topologies of possible elements in order to ensure optimal solution of the whole system.

The paper further describes the design of the current converter to the voltage that is required to determine parameters of the appliance.

## **Key words**

Energy harvesting; DC/DC converter; thermoelectric cell; low temperature difference; solar cell; no-battery.

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 8 -
Seznam použitých zkratk.....	- 10 -
Seznam obrázků .....	- 11 -
Seznam tabulek .....	- 13 -
Úvod.....	- 14 -
1    Analýza zdrojů energie pro energy harvesting.....	- 15 -
1.1    Mechanická energie.....	- 15 -
1.1.1    Piezoelektrikum.....	- 15 -
1.1.2    Mechanický oscilátor .....	- 15 -
1.2    Světelná energie .....	- 16 -
1.2.1    Fotovoltaický článek .....	- 16 -
1.3    Tepelná energie .....	- 17 -
1.3.1    Seebeckův jev.....	- 18 -
1.3.2    Peltierův jev.....	- 18 -
1.3.3    Thomsonův jev .....	- 18 -
1.3.4    Peltierův článek .....	- 19 -
2    Rozbor topologie napájecího systému.....	- 20 -
2.1    Měniče.....	- 21 -
2.1.1    AC/DC měnič.....	- 21 -
2.1.2    DC/DC měnič .....	- 21 -
2.1.3    AKUMULACE (SUPERKAPACITOR).....	- 24 -
2.2    PRIMÁRNÍ ČLÁNEK (AKUMULÁTOR) .....	- 26 -
2.3    Základní parametry zátěže (spotřebiče) .....	- 26 -
3    Návrh původního napájecího systému .....	- 27 -
3.1    Určení parametrů spotřebiče .....	- 28 -
3.1.1    Přípravek pro měření spotřeby .....	- 28 -
3.1.2    Měření parametrů spotřebičů.....	- 31 -
3.2    Návrh měniče pro zdroj z tepla .....	- 32 -
3.2.1    Návrh měřicího přípravku pro zdroj z tepla .....	- 32 -
3.2.2    Metodika měření a analýza parametrů zdroje z tepla .....	- 35 -

3.2.3	Analýza trhu DC/DC měničů .....	39 -
3.2.4	LTC3108 .....	40 -
3.3	Návrh měniče pro zdroj ze světla .....	41 -
3.3.1	Měřicí přípravek pro zdroj ze světla.....	41 -
3.3.2	Metodika měření a analýza parametrů zdroje ze světla.....	42 -
3.3.3	BQ25504 .....	45 -
3.4	Měření vlastností superkapacitorů.....	45 -
3.4.1	Teoretický rozbor měření .....	46 -
3.4.2	Naměřené a vypočtené údaje.....	47 -
3.5	Návrh výstupního měniče.....	48 -
4	Realizace a verifikace vybraných DC/DC měničů.....	49 -
4.1	Vstupní DC/DC měnič s LTC3108 pro zdroj z tepla .....	49 -
4.1.1	Měření parametrů .....	50 -
4.1.2	Srovnání naměřených dat s teoretickými.....	52 -
4.2	Vstupní DC/DC měnič pro zdroj ze světla s BQ25504 .....	52 -
4.2.1	Měření parametrů .....	53 -
4.2.2	Srovnání naměřených dat s teoretickými.....	53 -
4.3	Výstupní DC/DC měnič s BQ25570 .....	54 -
4.3.1	Měření parametrů .....	54 -
4.3.2	Srovnání naměřených dat s teoretickými.....	55 -
4.4	Měření vybrané topologie bez akumulace.....	56 -
	Závěr .....	57 -
	Použitá literatura .....	58 -
	Seznam příloh.....	60 -
	Seznam příloh na CD .....	61 -

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
$\alpha$	$V \cdot K^{-1}$	Seebeckův koeficient
$A_U$	-	Napěťové zesílení
$C$	F	Elektrická kapacita
$E$	J	Energie
$\phi_{12}(T)$	V	Potenciál při teplotě T
$I$	A	Elektrický proud
$\Delta I$	A	Změna proudu
$i_c$	A	Okamžitý proud kondenzátoru
$I_d$	A	Vybíjecí proud
$l$	m	Délka
$\Delta l$	m	Rozdíl délek
$P$	W	Výkon
$Q$	C	Náboj
$R$	$\Omega$	Elektrický odpor
$R_{ESR}$	$\Omega$	Hodnota sériového odporu
$R_i$	$\Omega$	Vnitřní odpor
$R_{sen}$	$\Omega$	Odpor snímacího rezistoru
$t$	s	Čas
$t_d$	s	Čas vybíjení
$T$	K	Termodynamická teplota
$\Delta T$	K	Teplotní rozdíl
$\frac{\Delta T}{\Delta l}$	$K \cdot m^{-1}$	Teplotní gradient
$U$	V	Napětí
$U_+$	V	Kladné napájecí napětí
$U_0$	V	Napětí naprázdno
$U_C$	V	Napětí kondenzátoru



$U_{C0}$	V	Napětí kondenzátoru před vybíjením
$U_{CC}$	V	Napájecí napětí
$u_C$	V	Okamžité napětí kondenzátoru
$U_e$	V	Seebeckovo napětí
$U_f$	V	Ustálené napětí kondenzátoru po odpojení zátěže
$U_k$	V	Napětí v k-tém kroku
$U_{k-1}$	V	Napětí v předchozím kroku
$U_{min}$	V	Minimální napětí s připojenou zátěží
$U_{OZ}$	V	Výstupní napětí operačního zesilovače
$U_{ref}$	V	Referenční napětí

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>A/D</b>	Analogově-digitální
<b>AC</b>	Střídavý proud (anglicky alternating current)
<b>CNC</b>	Počítačem řízený obráběcí stroj (anglicky computer numerical control)
<b>DC</b>	Střenosměrný proud (anglicky direct current)
<b>EEPROM</b>	Elektricky mazatelná i programovatelná paměť (anglicky electrically erasable programmable read-only memory)
<b>ESR</b>	Ekvivalentní sériový odpor (anglicky equivalent series resistance)
<b>LDO</b>	Nízko úbytkový (anglicky low-dropout)
<b>LCD</b>	Displej z tekutých krystalů (anglicky liquid crystal display)
<b>LED</b>	Světelná dioda (anglicky light-emitting diode)
<b>Li-ion</b>	Lithium-iontová baterie
<b>MCU</b>	Jednočipový počítač (anglicky microcontroller)
<b>MOSFET</b>	Druh unipolárního tranzistoru (anglicky metal oxide semiconductor field effect transistor)
<b>MPPT</b>	Metoda dosažení maximálního výkonu (anglicky maximum power point tracking)
<b>OP-PIK</b>	Operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost
<b>OZ</b>	Operační zesilovač
<b>PT1000</b>	Platinové odporové čidlo teploty se základním odporem 1000 Ω
<b>PWM</b>	Pulzně šířková modulace (anglicky pulse width modulation)
<b>RTC</b>	Obvod reálného času (anglicky real-time clock)
<b>TEC</b>	Termoelektrický chladič (anglicky thermoelectric cooler)
<b>TEG</b>	Termoelektrický generátor (anglicky thermoelectric generator)
<b>TEG(C)</b>	TEG, nebo TEC

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1:	Ilustrační fotografie solárních článků.....	- 17 -
Obrázek 1.2:	Ilustrační snímek TEG článku.....	- 19 -
Obrázek 2.1:	Topologie napájecího systému (a – přímý systém, b – systém s akumulací, c – systém s baterií).....	- 20 -
Obrázek 2.2:	Principiální zapojení zvyšujícího měniče s kapacitou.....	- 22 -
Obrázek 2.3:	Principiální schéma zvyšovače s indukčností.....	- 22 -
Obrázek 2.4:	Principiální schéma snižovače s kapacitou .....	- 23 -
Obrázek 2.5:	Principiální schéma snižovače s indukčností .....	- 23 -
Obrázek 2.6:	Principiální schéma invertoru s kapacitou.....	- 23 -
Obrázek 2.7:	Principiální schéma invertoru s indukčností .....	- 24 -
Obrázek 2.8:	Ukázka různých superkapacitorů .....	- 24 -
Obrázek 2.9:	Ilustrační fotografie provedení baterie .....	- 26 -
Obrázek 3.1:	Zvolená topologie napájení .....	- 27 -
Obrázek 3.2:	Principiální schéma převodníku I/U .....	- 28 -
Obrázek 3.3:	Upravené zapojení převodníku I/U .....	- 29 -
Obrázek 3.4:	Schéma rozdílového (diferenčního) zesilovače.....	- 30 -
Obrázek 3.5:	Výsledné schéma převodníku I/U .....	- 31 -
Obrázek 3.6:	Teplotní čidlo PT1000 (porovnání velikosti s mincí).....	- 32 -
Obrázek 3.7:	Drážka v profilu pro PT1000.....	- 32 -
Obrázek 3.8:	Schéma budiče výkonového tranzistoru a rezistoru .....	- 33 -
Obrázek 3.9:	Přípravek pro měření TEG(C) článků .....	- 34 -
Obrázek 3.10:	Principiální zapojení měření odporu dvou čidel PT1000 .....	- 35 -
Obrázek 3.11:	Měřicí schéma pro měření zatěžovací charakteristiky .....	- 36 -
Obrázek 3.12:	Ukázka měřícího pracoviště .....	- 37 -
Obrázek 3.13:	Zatěžovací charakteristika 2. TEG článku.....	- 38 -
Obrázek 3.14:	Převodní charakteristika čtyř TEG článků .....	- 38 -
Obrázek 3.15:	Schéma měniče s LTC3108.....	- 41 -
Obrázek 3.16:	Fotografie vytisknuté clony.....	- 42 -
Obrázek 3.17:	Ukázka pracoviště pro měření solárních článků.....	- 42 -
Obrázek 3.18:	Zatěžovací charakteristika 1. článku .....	- 43 -

Obrázek 3.19:	Zatěžovací charakteristika 2. článku .....	- 43 -
Obrázek 3.20:	Převodní charakteristiky pro 1. článek .....	- 44 -
Obrázek 3.21:	Převodní charakteristika pro 2. článek .....	- 44 -
Obrázek 3.22:	Schéma měniče s BQ25504.....	- 45 -
Obrázek 3.23:	Průběhy napětí na měřených kondenzátorem.....	- 47 -
Obrázek 4.1:	Fotografie vyrobené DPS s LTC3108 .....	- 49 -
Obrázek 4.2:	Měřicí schéma pro měření DC/DC měničů .....	- 50 -
Obrázek 4.3:	Zatěžovací charakteristika měniče s LTC3108 .....	- 51 -
Obrázek 4.4:	Průběh signálu na převodním transformátoru .....	- 51 -
Obrázek 4.5:	Fotografie vyrobeného DC/DC měniče s BQ25504.....	- 52 -
Obrázek 4.6:	Zatěžovací charakteristika DC/DC měniče s BQ25504 .....	- 53 -
Obrázek 4.7:	Fotografie výstupního DC/DC měniče.....	- 54 -
Obrázek 4.8:	Zatěžovací charakteristika měniče s BQ25570 .....	- 54 -
Obrázek 4.9:	Ukázka měření zatěžovací charakteristiky BQ25570.....	- 55 -
Obrázek 4.10:	Blokové měřicí schéma celé topologie.....	- 56 -
Obrázek 4.11:	Zatěžovací charakteristika zvolené topologie .....	- 56 -

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1:	Použité měřicí přístroje pro měření zatěžovací charakteristiky TEG(C) článků.....	- 36 -
Tabulka 3.2:	Přehled parametrů jednotlivých článků.....	- 39 -
Tabulka 3.3:	Srovnání obvodů pro DC/DC měniče .....	- 40 -
Tabulka 3.4:	Použité měřicí přístroje pro měření zatěžovací charakteristiky solárních článků ...	- 42 -
Tabulka 3.5:	Tabulka vypočtených průměrných hodnot svodového proudu .....	- 48 -
Tabulka 3.6:	Srovnání vypočtených hodnot s katalogovými údaji .....	- 48 -
Tabulka 4.1:	Použité měřicí přístroje pro měření DC/DC měničů.....	- 50 -
Tabulka 4.2:	Naměřené a katalogové údaje pro LTC3108 .....	- 52 -
Tabulka 4.3:	Srovnání parametrů BQ25504 .....	- 53 -
Tabulka 4.4:	Srovnání parametrů BQ25570 .....	- 55 -

## Úvod

Cílem bakalářské práce je navrhnout co možno nejoptimálnější řešení napájení systému, který má měřit průtok média (např. vodoměry), bez použití baterií. Energie potřebná pro napájení systému by se měla „získávat“ z prostředí nebo z měřeného média.

V první části práce je provedena obecná analýza možností zdrojů pro energy harvesting. Se zřetelem na možnosti využití tepla v případech měření dodaného tepla. Vždy je zde uvedeno tradiční pojetí výroby elektřiny. Nejčastějším alternativním způsobem získání elektrické energie je přeměnou světelné energie. K této přeměně dochází v solárních článcích, s kterými je možné se setkat u kapesních kalkulátorů. Další možností je využití teplotního rozdílu. Specializované termočlánky jsou schopny teplotní rozdíl přeměnit na elektrickou energii. Jiný způsob může být přímá přeměna mechanické energie na elektrickou v elementech obsahující speciální látky schopné piezoelektrického jevu.

V další kapitole je nastíněno základní rozdělení topologií. Jednotlivé topologie jsou popsány, především rozdíly mezi nimi. Následně zde jsou teoreticky popsány jednotlivé prvky použité v topologii. Každá topologie obsahuje vybraný zdroj elektrické energie, který dodává elektrickou energii o určitých parametrech. Tyto parametry se většinou neshodují s parametry, které požaduje zátěž (spotřebič), proto se musí elektrická energie ze zdroje přeměnit na elektrickou energii, kterou požaduje spotřebič. K této konverzi dochází ve speciálních měničích. Pokud zdroj dodává stejnosměrnou elektrickou energii, je většinou použit DC/DC měnič. Jedná se o většinu případů. Je-li zdroj střídavý, dodává střídavou elektrickou energii, používá se AC/DC měnič. Nicméně střídavých zdrojů je méně než stejnosměrných, proto i použití AC/DC měničů není příliš běžné.

Ve třetí kapitole je popsán návrh jednotlivých DC/DC měničů pro daný zdroj elektrické energie. Z důvodu efektivního návrhu měničů bylo třeba provést analýzu parametrů jednotlivých komponentů. Jednotlivé zdroje energie bylo třeba změřit a určit, zdali se dají linearizovat, a také navrhnout vhodný měnič, který využije maximální energii dodávanou zdrojem.

Ve čtvrté kapitole je zobrazena realizace jednotlivých DC/DC měničů. Měření jejich vlastností a srovnání naměřených dat s daty uvedenými v příslušných katalozích výrobců. Dále je zde provedeno měření na kaskádním zapojení jednotlivých realizovaných měničů.

V závěru práce je provedena balance návrhů a dosažených výsledků vzhledem k udané nízké spotřebě ovládacího a měřicího systému.

# 1 Analýza zdrojů energie pro energy harvesting

Tradičně elektrickou energii získáváme přeměnou pomocí chemických reakcí v primárních, nebo sekundárních člancích, které se obecně označují jako baterie, akumulátory. Další tradiční možností je přeměna mechanické energie na elektrickou v generátorech (popř. dynamech).

Mezi netradiční zdroje lze zařadit přímou přeměnu energie z tepla (např. termoelektrické články), sluneční energii anebo přímo z mechanické energie (např. piezoelektrické měniče).

## 1.1 Mechanická energie

Jak již bylo uvedeno, klasický způsob přeměny mechanické energie na energii elektrickou je pomocí alternátoru, nebo dynama. Jinou metodou je využití vlastností piezoelektrických materiálů.

### 1.1.1 Piezoelektrikum

Jedním ze způsobů přeměny mechanické energie na elektrickou je využití piezoelektrického jevu, který umožňují piezoelektrické materiály.

*„Piezoelektrické materiály (piezoelektrika) jsou dielektrika, která lze polarizovat účinkem vnějších mechanických napětí. Vznik elektrického náboje na povrchu piezoelektrika následkem jeho deformace se nazývá přímý piezoelektrický jev. Opačný jev, tj. změna objemu a tvaru piezoelektrika účinkem vnějšího elektrického pole, se nazývá elektrostrikce.“* (cit z [1] s. 45)

Elektrostrikce se využívá u krystalů a oscilátorů přesných kmitů, nebo piezoelektrických reproduktorů. Důležitějším jevem pro získání energie je piezoelektrický jev. Tento princip je používán delší dobu například u piezoelektrických zapalovačů plamene.

Nejčastěji piezoelektrické materiály jsou křemen (jak přírodní, tak syntetický), tuhé roztoky  $\text{PbTiO}_3$  a  $\text{PbZrO}_3$ . [1]

Vhodným zdrojem mechanického napětí pro piezoelektrický materiál jsou vibrace, které jsou nutné pro generování elektrického signálu. Vibrace vytvoříme ve vhodném mechanickém oscilátoru.

### 1.1.2 Mechanický oscilátor

Vhodné vibrace pro generování elektrického signálu z piezoelektrika lze vytvořit realizací mechanického oscilátoru.

Velmi jednoduchým mechanickým oscilátorem je kyvadlo. Ale pro získávání energie z piezoelektrika jsou vhodnější způsoby. V potrubí, v němž proudí určité medium (tekutina), je umístěna překážka. V potrubí nastává pravidelné střídavé odtrhávání vírů a za překážkou vzniká

tzv. Kármánova vírová stezka. Pokud se do vhodné vzdálenosti umístí piezoelektrikum, vznikne generátor elektrické energie.[2]

Nevýhodou tohoto řešení je složité mechanické řešení vyvedení jednotlivých vodičů od piezoelektrika k dalšímu zpracování. Další nevýhodou je, že element přichází do kontaktu s médiem, ale to lze řešit i nepřímo na úkor snížení účinnosti.

Výstupní napětí z piezoelektrických měničů má střídavý charakter. Je to třeba mít na paměti při návrhu měniče.

## 1.2 Světelná energie

Existuje mnoho zdrojů světelné energie. Asi úplně nejběžnějším je Slunce, které dodává svou energii na Zemi právě pomocí světla. Jedná se o přirozený zdroj světla, jiné zdroje světla se označují jako umělé. Umělým zdrojem světla je třeba plamen, žárovka, nebo výbojka.

Viditelné světlo má vlnové délky od 390 nm až 760 nm, při čemž ve slunečním svitu jsou zastoupeny všechny tyto délky. Spektrum podobné slunečnímu má žhavená, obyčejná, žárovka. Rtuťové výbojky, zářivky a vysokotlaké výbojky, vytváří viditelné světlo pomocí luminoforu, který přemění UV záření na viditelné světlo. Spektrum takto vzniklého světla má dominantní modrou složku. Podobné spektrum mají i zdroje s LED.

Existují dva možné postupy (přímý a nepřímý). Nepřímým způsobem je myšleno ohřev určitého média za účelem roztočení alternátoru (fototermická přeměna). Přímý postup využívá tzv. fotovoltaické články, které pracují především na principu vnitřního fotoelektrického jevu.

### 1.2.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaické články jsou většinou zhotoveny z polovodiče (nejčastěji křemíku, GaAs). Články jsou nejčastěji tvořeny tenkou destičkou křemíku. Křemík může být monokrystalický (příliš drahý), polykrystalický či dokonce amorfni (levnější, rychleji stárnou).

Destička je z polovodičového materiálu typu P (dotovaná např. bórem), na jehož povrchu je epitaxním růstem vytvořena velmi tenká vrstva typu N (dotovaná např. fosforem). Nakonec je destička doplněna o kovové kontakty. Kontakt na vrstvě typu N je sítového typu, aby se světlo mohlo dostat do PN přechodu.

Při osvětlení destičky (např. LED svítlnou) dopadnou fotony do PN přechodu. Dopadem fotonu se uvolňují záporné elektrony a po nich ve struktuře vzniknou tzv. díry. Z elektrod (kontaktů) můžeme odebírat elektrickou energii. Obecně jeden článek má napětí 0,5 V a na 1 cm<sup>2</sup> je možné získat 12 mW.

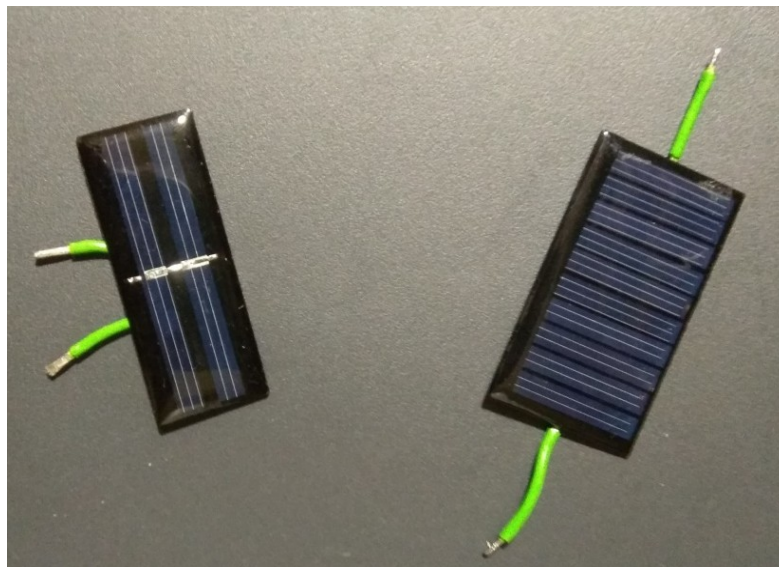
Jak bylo uvedeno výše, je možné se setkat s třemi základními druhy článků. Monokrystalické jsou z křemíkových plátů získaných z velkých monokrystalů. Bývají tmavě modré, nebo tmavě šedé s účinností okolo 15 %. Polykrystalické (multikrystalické) jsou vyrobeny z velkých křemíkových krystalů. Články jsou modré a mají asi o procento menší účinnost než monokrystalické. Amorfni křemíkové články nejsou získávány z krystalů, ale



křemík je uměle nanášen na výsledný povrch (např. sklo, folii). Mají hnědou, černou, nebo zlatavou barvu. Účinnost se pohybuje od 6 % do 8 %. Jejich jedinou výhodou je schopnost výroby i na folii (neobsahují žádné tvrdé destičky). Tyto články nalezneme třeba v kalkulačkách.

Články lze skládat do série, paralelně, nebo sérioparalelně. Tak vzniká solární baterie, nebo solární panel. Sériovým zapojením dosahujeme žádaného výstupního napětí, paralelním řazením zase žádaný výstupní proud.[1],[3]

Výstupní napětí je stejnosměrné. Polarita napětí se za žádných podmínek nemění.



Obrázek 1.1: Ilustrační fotografie solárních článků

### 1.3 Tepelná energie

Klasická koncepce roztáčí točivý stroj (alternátor, nebo dynamo). Spalováním tuhých paliv, jako jsou uhlí a dřevo, se získává vodní pára, která má vhodné parametry na roztočení parní turbíny. Na turbínu je připojený vhodný točivý stroj, který generuje požadovanou energii. Pro získání elektrické energie z tepla jsou tedy nutné dvě přeměny. Prvně se tepelná energie přemění na mechanickou, následně se mechanická energie přemění na elektrickou. Účinnost tohoto procesu není velká. Zajímavější je tedy přímá metoda využívající články, které se obecně označují jako termočlánky.

Termočlánky přeměňují tepelnou energii na energii elektrickou, nebo naopak. Platí pro ně termoelektrické jevy. Proto bylo vytvořeno označení pro termoelektrické generátory TEG a pro termoelektrické chladiče TEC. Speciální články jsou termoelektrické články pro měřicí účely.[4]

### 1.3.1 Seebeckův jev

Spojí-li se dva vodiče (popř. polovodiče) tak, aby vznikly dva spoje, a oba konce mají jinou teplotu (existuje-li teplotní gradient), je mezi jednotlivými spoji napětí. Napětí je závislé na potenciálu spoje. Potenciál spoje je závislý na teplotě spoje.

$$U_e = \phi_{12}(T_2) - \phi_{12}(T_1), \quad (1.1)$$

kde  $U_e$  je Seebeckovo napětí  $[U_e] = V$ ,

$\phi_{12}(T)$  je potenciál při dané teplotě  $[\phi_{12}(T)] = V$ , protože jsou oba spoje ze stejného materiálu, je potenciál závislý pouze na teplotě.

Pro malé teplotní rozdíly lze zapsat vztah pro Seebeckovo napětí jako přímou úměru.

$$U_e = \alpha(T_2 - T_1) = \alpha\Delta T, \quad (1.2)$$

kde  $U_e$  je Seebeckovo napětí  $[U_e] = V$ ,

$\alpha$  je Seebeckův koeficient (termoelektrický koeficient)  $[\alpha] = V \cdot K^{-1}$ ,

$T$  je termodynamická teplota  $[T] = K$ ,

$\Delta T$  je teplotní rozdíl  $[\Delta T] = K = ^\circ C$ .

Seebeckův koeficient je také teplotně závislý, proto se vzrůstající teplotou se zhoršuje linearita a nelze využít vztah přímé úměry. Hodnota Seebeckova koeficientu pro kovy je řádově  $(10^{-6} \div 10^{-5}) V \cdot K^{-1}$  a pro polovodiče  $(10^{-5} \div 10^{-3}) V \cdot K^{-1}$ . [5]

### 1.3.2 Peltierův jev

Je jev opačný k jevu Seebeckovu. Pokud se připojí výše popsany články na zdroj stejnosměrné energie, začne se jeden spoj ohřívat a druhý ochlazovat. Ohřívání, nebo ochlazování spoje závisí na směru proudu (polaritě zdroje). [6]

### 1.3.3 Thomsonův jev

Je to třetí termoelektrický jev, který říká, jestliže je kovová tyč délky  $l$  zahřívána na jednom konci, vznikne teplotní gradient  $\frac{\Delta T}{\Delta l}$  a mezi konci vznikne nepatrné termoelektrické napětí  $U$ . [7]

Moderní termoelektrické články jsou vyrobeny z polovodičů. Označují se jako Peltierovy články. V popisu je většinou uvedeno, jestli se jedná o TEG, nebo TEC.

#### 1.3.4 Peltierův článek

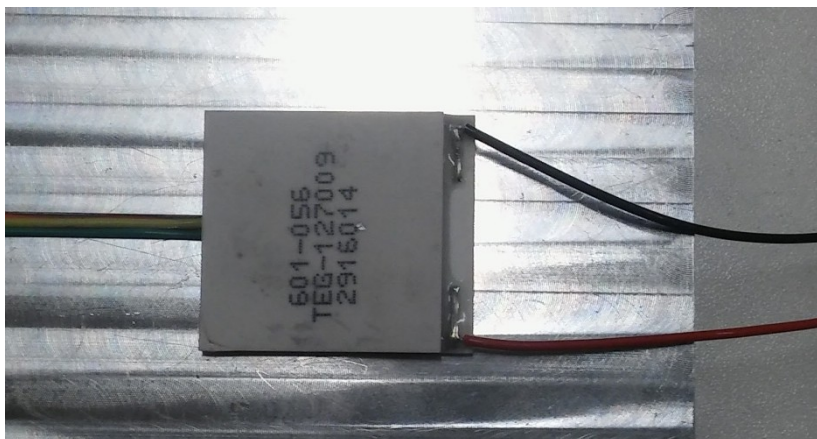
Peltierův článek se skládá ze dvou polovodičových tělísek a spojovacích můstků. Můstky zprostředkovávají přívod elektrické energie a také absorbují a vyzařují teplo (jsou vodiče tepla a elektřiny).

Jako základní polovodičovým materiálem jsou vizmut-telluridy. Polovodič typu N je Bi-Te-Se, polovodič typu P je Bi-Sb-Te. Tyto polovodiče mají vhodné parametry (malý měrný odpor a dobrou tepelnou vodivost). Jako materiál pro můstky se používá měď (malý měrný odpor, lze ji letovat). Ale měď má i své nevýhody. Mezi hlavní patří možnost difuze do polovodiče. Při špatné technologii může dojít k značnému přechodovému odporu mezi můstkem a polovodičem.

Jednoduché články se spojují do série, paralelně nebo sérioparalelně. Jako izolant se využívá keramiky, která je dobrý elektrický izolant, ale má dobrou tepelnou vodivost. [8]

Peltierovy články byly původně určeny pro chlazení (TEC), běžně se s nimi lze setkat v autochladničkách. Další možností je využít Peltierův článek pro ohřev. Časem se na trhu začaly objevovat Peltierovy články pro výrobu elektřiny (TEG). Ale není problém zaměnit TEG za TEC a naopak. Záleží na mnoha faktorech. Může se stát, že v daných podmínkách je účinnější TEC než TEG a při jiných podmínkách je tomu naopak.

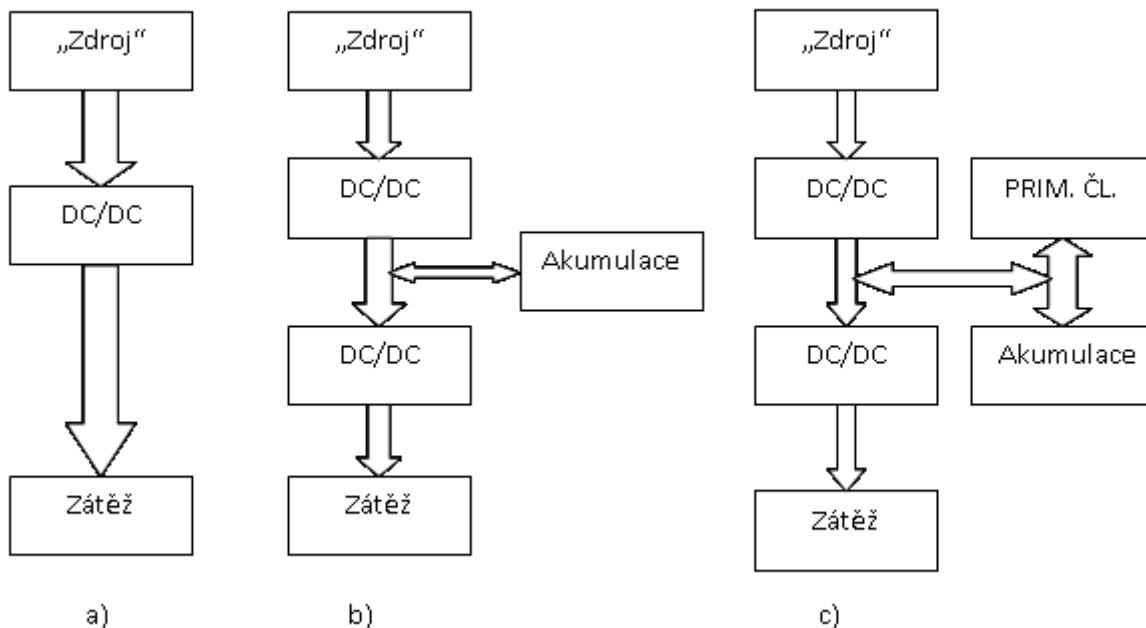
Výstupní napětí je stejnosměrné, ale polarita závisí na směru proudění tepla.



Obrázek 1.2: Ilustrační snímek TEG článku

## 2 Rozbor topologie napájecího systému

Obecně lze zapojit systém do tří základních uspořádání (viz obrázek 2.1). Každé uspořádání má své výhody a nevýhody, a proto je třeba dobře zanalyzovat zadanou úlohu, aby se vybralo neoptimálnější řešení. Jako "zdroj" se uvažuje stejnosměrný zdroj (např. fotovoltaický článek).



Obrázek 2.1: Topologie napájecího systému (a – přímý systém, b – systém s akumulací, c – systém s baterií)

Nejjednodušší konstrukce je podle obrázku 2.1a). Využívá pouze jeden DC/DC měnič, tedy menší počet součástek vede k větší spolehlivosti (menší poruchovost) a k nejnižší ceně. Nevýhodou je, že nelze akumulovat energii. Při připojení „zdroje“ (měniče energie na elektrickou, např. solární panel) najede DC/DC měnič a následně napětí zátěže, výstup z tohoto DC/DC měniče, je tedy konstantní a navržené pro konkrétní spotřebič (například pro přímé napájení MCU 3.3 V). Je možné připojit filtrační kondenzátor, který je schopen pokrýt krátkodobý výpadek napájení.

Druhou variantou je přidání možnosti akumulace elektrické energie (na obrázku 2.1b))především v superkapacitorech (kapacita kondenzátoru nad 1 F). Tedy možnost pokrýt delší výpadek (využívá efektivněji kapacitu). Nevýhodou je použití dvou DC/DC měničů, což vede k nižší účinnosti celkového zapojení (při účinnosti DC/DC měničů 80 % je celková účinnost 64 %). Na superkapacitoru je možné naměřit napětí připomínající pilu, není tedy konstantní, o konstantní napětí na zátěži se stará druhý DC/DC měnič. Dále použitím superkondenzátorů se zvětšuje i velikost řešení a poruchovost.

Třetí možnost je zobrazena na obrázku 2.1c). Oproti druhé možnosti obsahuje i primární článek (akumulátor), který je nutný v systémech, které potřebují znát čas a datum i při výpadku napájení. Bohužel z toho plyne i největší nevýhoda této koncepce, protože primární článek má omezenou životnost a musí se v pravidelných intervalech měnit.

## 2.1 Měniče

Měniče jsou nejdůležitější součástí všech topologií. Je to zařízení upravující vstupní napětí ze zdrojů (zdroje byly popsány v předchozí kapitole) na napětí předem definované výstupní. V dané aplikaci jsou vhodné pouze dva základní druhy DC/DC a AC/DC měniče.

### 2.1.1 AC/DC měnič

Vstupní napětí je střídavé napětí, výstupním napětí je stejnosměrné. Asi nejjednodušší AC/DC měničem je diodový usměrňovač. Lepší AC/DC měniče jsou už plně integrované do jednoho čipu. Stačí k danému čipu připojit jen málo pasivních součástí. Příkladem takového čipu je LTC3588. Pokud je vstupní napětí dostatečně velké, může se usměrnit klasickým usměrňovačem a přivést na DC/DC měnič.

AC/DC měnič se využije při použití piezoelektrik jako zdroje energie. Klasická koncepce AC/DC měniče je spojení usměrňovače a DC/DC měniče.

### 2.1.2 DC/DC měnič

Upravuje vstupní stejnosměrné napětí na výstupní stejnosměrné napětí. Výstupní napětí může mít jinou velikost a také může být galvanicky oddělené. Lze jej realizovat za použití jednoho integrovaného obvodu a malého počtu pasivních součástí. Ve velmi náročných aplikacích se DC/DC měniče staví z diskretních součástí, aby se dosáhlo požadovaných parametrů, které nejsou splnitelné za použití integrovaného obvodu.

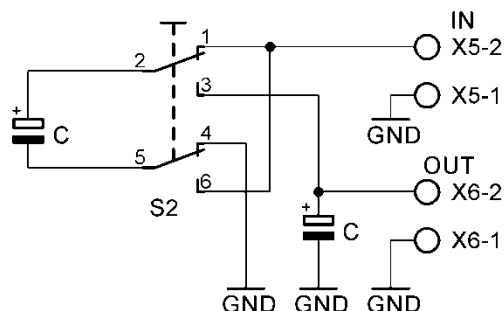
Podle výstupního napětí rozdělujeme DC/DC měniče na:

- zvyšovače napětí (step-up, boost-converter) - výstupní napětí je vyšší než vstupní,
- snižovače napětí (step-down, buck-converter) - výstupní napětí je nižší než vstupní,
- invertory – výstupní napětí má opačnou polaritu než vstupní,
- oddělovací – výstupní napětí je stejné, ale je galvanicky oddělené.

**2.1.2.1 Zvyšovač napětí** může být rozdělen podle použité akumulární/převodní součásti. Rozlišují se tři druhy měničů: měniče s indukčností (akumulační tlumivkou), bezindukční (akumulační kondenzátor), nebo s transformátorem (většinou feritový může být galvanicky oddělen).

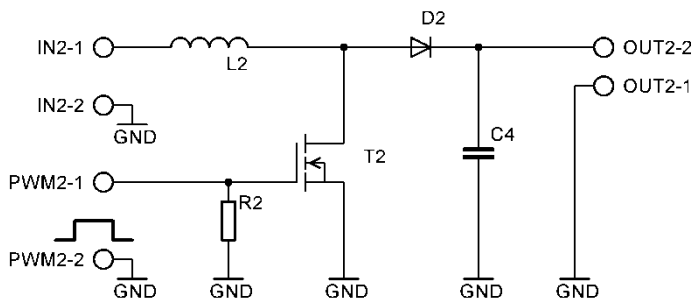
Bezindukční využívá vhodného spínání kapacit. Jedná se o zvyšující nábojovou pumpu. Prvně se nabije první kondenzátor ze vstupního zdroje. Následně se první kondenzátor přepne tak, aby jeho záporný pól byl připojený na kladný pól zdroje. Kladný pól prvního kondenzátoru se připojí na kladný pól druhého kondenzátoru, který má druhou elektrodu spojenou se záporným pólem zdroje. Přepínání se provádí vysokou frekvencí, vyšší jak 25 kHz. Výstupní

napětí z takového měniče se odebírá z druhého kondenzátoru a napětí je dvakrát vyšší než vstupní. Tyto zdvojovače napětí lze kaskádně řadit. Jsou určeny pro malé odběry, nemají vysokou účinnost, výhodou je malé magnetické rušení.



Obrázek 2.2: *Principiální zapojení zvyšujícího měniče s kapacitou*

Měnič s akumulací tlumivkou využívá vlastností tlumivky, která se chová jako zdroj proudu. Měnič má dva cykly. V prvním cyklu se sepne spínací tranzistor. Ze zdroje začne procházet proud přes tlumivku. V tlumivce začne akumulovat energie v magnetickém poli. V druhém cyklu se tranzistor rozpojí, protože tlumivka se v tuto chvíli se začne chovat jako zdroj proudu. Elektrický proud nyní teče přes diodu do kondenzátoru. Kondenzátor se nabije na napětí odpovídající proudu a času, následuje opět první cyklus, při dalším druhém cyklu se opět nabije o stejné napětí jak předtím. Postupně napětí roste na nastavenou hodnotu. Spínací frekvence se volí vyšší jak 25 kHz. Tyto měniče jsou pro větší proudy než bezindukční měniče, nevýhodou je značné magnetické rušení.



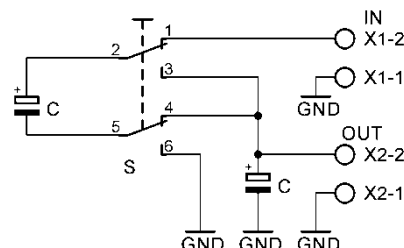
Obrázek 2.3: *Principiální schéma zvyšovače s indukčností*

Měnič s transformátorem obsahuje střídač, který vytvoří střídavé napětí, které je schopen transformátor přenést. Tato koncepce je vhodná pro velké proudy. Spínací kmitočet se volí podle použitého transformátoru, většinou vyšší jak 15 kHz. Transformátor může být zapojen jako autotransformátor (bez galvanického oddělení), nebo klasicky galvanicky oddělen.

**2.1.2.2 Snižovač napětí** je obdobně jako zvyšovač napětí realizován ve třech variantách podle akumulacího/převodního prvku (s tlumivkou, kondenzátorem, transformátorem). Princip snižovače s transformátorem je shodný se zvyšovačem s transformátorem, jenom přenos transformátoru je snižující.

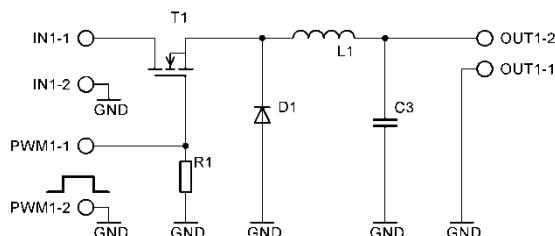
Bezindukční měnič (nábojová pumpa) jako snižovač pracuje následovně ve dvou taktech. V prvním taktu jsou kondenzátory C1 a C2 spojeny sériově a připojeny na zdroj.

V druhém taktu se kondenzátory propojí paralelně a připojí se k zátěži. Výstupní napětí je poloviční než vstupní napětí. Díky paralelnímu spojení není velký rozptyl kapacit tak problematický. Spínací frekvence se volí vyšší jak 25 kHz.



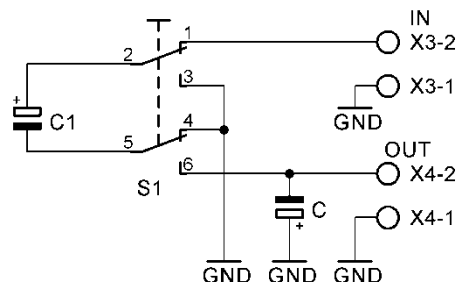
Obrázek 2.4: Principiální schéma snížovače s kapacitou

Měnič s akumulací tlumivkou, obsahuje PWM modulátor a tlumivka s kondenzátorem tvoří filtr. Střídou se určuje velikost stejnosměrné složky, která se získává právě dolní propustí. Využívá se akumulacích vlastností cívky a kondenzátory. Nosný kmitočet se volí podle zvolené tlumivky obecně vyšší jak 25 kHz.



Obrázek 2.5: Principiální schéma snížovače s indukčností

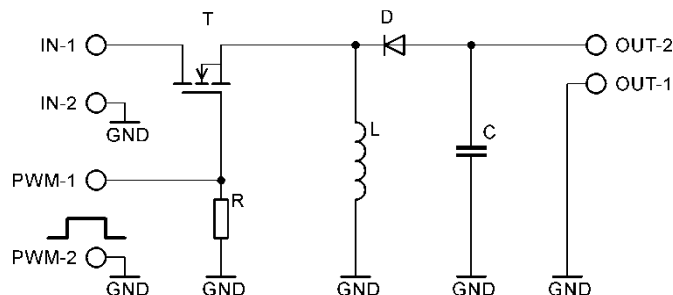
**2.1.2.3 Invertor** je DC/DC měnič měnící polaritu napětí. Nejpoužívanějším zapojením invertoru je nábojová pumpa. Bezindukční invertor je základní zapojení nábojové pumpy. V prvním taktu je první kondenzátor (C1) připojen na vstupní napětí a nabíjí se. V druhém kroku se kladný pól prvního kondenzátoru připojí na zem (GND). Záporný pól se současně přepojí ze země (GND) na druhý kondenzátor, do kterého se přenesou část náboje z kondenzátoru C1. Výstupní napětí je opačné polarity než vstupní.



Obrázek 2.6: Principiální schéma invertoru s kapacitou

Pro větší výkony se používá měnič s akumulací tlumivkou. V prvním taktu se sepnou spínací tranzistor, cívku začne procházet proud. V druhém kroku se rozpojí spínací tranzistor. Cívka se chová jako zdroj proudu, tedy potřebný proud se nyní odebírá přes diodu a zátěž.

Podle smyslu proudu je výstupní napětí opačné polaroty než vstupní. Spínací frekvence se volí nad slyšitelným pásmem.

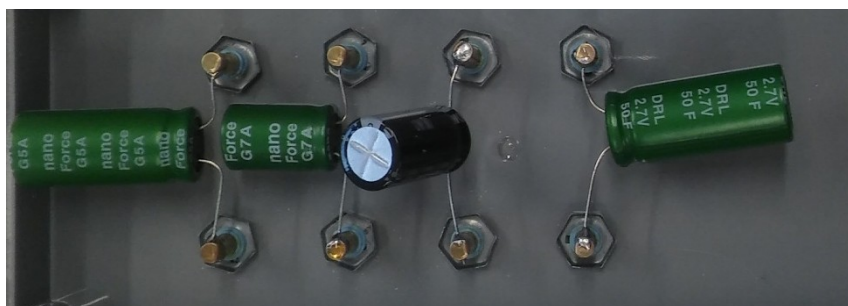


Obrázek 2.7: *Principiální schéma invertoru s indukčností*

Při použití měniče s transformátorem se jen prohodí výstupy z usměrňovače, jinak je zapojení stejné jako u zvyšovače/snižovače. Tato koncepce není skoro vůbec používána, pokud není nutné galvanické oddělení.[9][10][11]

### 2.1.3 AKUMULACE (SUPERKAPACITOR)

Superkapacitor je označení kondenzátoru s vysokou kapacitou. Řádově s kapacitou větší než 1 F. Klasické kondenzátory s pevným dielektrikem (především keramické apod.) mívají maximální kapacitu řádu desítek mikrofaraďů. Klasické „elektrolytické“ kondenzátory mívají maximální kapacitu řádu desítek milifaradů. V současné době jsou na trhu normálně k dostání superkapacity s kapacitou řádu jednotek kilofaraďů.



Obrázek 2.8: *Ukázka různých superkapacitorů*

**2.1.3.1 Srovnáním superkapacitorů a baterií** lze zjistit, že superkapacity mají teoreticky neomezenou životnost, nedochází u nich k degradaci elektrod, mají neomezený počet cyklů, malou impedanci (sériový odpor), velmi krátkou dobu nabíjení (omezena pouze vlastnostmi zdroje), vyšší účinnost nabíjecího/vybíjecího cyklu, teplotní rozsah běžně  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Mezi nevýhody oproti bateriím (Li-ion apod.) patří podstatně vyšší cena, při vybíjení klesá napětí lineárně až na nulu (nutnost použití měniče, pro využití celkové kapacity), maximální napětí je v současné době v jednotkách voltů, problematické je zapojování do série (svodové proudy, velký rozptyl kapacit).[4],[12]



**2.1.3.2 Nabíjení a vybíjení** je oproti akumulátoru jednodušší. Superkapacitory nevyžadují kontrolované nabíjení, musí se především hlídat maximální hodnota napětí, aby nedošlo k proražení dielektrika. Aktuální stav je určen sériovým odporem (ESR). Je nutná diagnostika případného opotřebení. Měří se krátkým vybíjecím pulzem. Jako i u jiných kondenzátorů je napětí úměrné absorbovanému náboji, tedy lze jednoznačně určit stav nabití.

Superkapacitory se mohou vybit až na nulovou hodnotu. Při velmi rychlých cyklech nabití a vybití (s kratší periodou jak 10 s) je nutné hlídat i oteplení kondenzátoru.

**2.1.3.3 Základní parametry a vlastnosti** jsou především jmenovitá kapacita  $C$ , maximální napětí (elektrická pevnost)  $U_N$ , sériový odpor  $R_{ESR}$ , maximální proud kondenzátoru  $I_{sc}$  a klidový proud  $I_L$ .

Pro měření je třeba zavést určité vzorce. První sada vztahů popisuje závislost proudu a napětí na kondenzátoru.

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}, \quad (2.1)$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_c dt, \quad (2.2)$$

Pro konstantní proud (většinou je snaha nabíjet konstantním proudem) lze výraz zjednodušit.

$$u_c = \frac{i_c}{C} \cdot t + u_c(0), \quad (2.3)$$

kde  $u_c$  je napětí na kondenzátoru  $[u_c] = V$ ,

$i_c$  je nabíjecí proud  $[i_c] = A$ ,

$C$  je kapacita kondenzátoru  $[C] = F$ ,

$t$  je čas  $[t] = s$ ,

$u_c(0)$  je napětí kondenzátoru v čase  $t = 0$  s (např. před nabíjením)  $[u_c] = V$ .

Další vztah zobrazuje závislost mezi napětím a akumulovanou energií.

$$E = \frac{1}{2} Q U_C = \frac{1}{2} C U_C^2, \quad (2.4)$$

kde  $E$  je akumulovaná energie v kondenzátoru  $[E] = J$ ,

$Q$  je náboj v kondenzátoru  $[Q] = C$

$U_C$  je napětí kondenzátoru  $[U_C] = V$ ,

$C$  je kapacita kondenzátoru  $[C] = F$ .

Tyto vztahy jsou základní vztahy pro obecně jakýkoliv ideální kondenzátor. V praktické části jsou využity pro zjištění reálných vlastností superkapacitorů.[3],[12]

## 2.2 PRIMÁRNÍ ČLÁNEK (AKUMULÁTOR)

Akumulátor se ve většině případů používá jako hlavní zdroj energie, proto bylo zvoleno označení primární článěk. Výhoda akumulátoru je ve vysoké kapacitě akumulované energie. Nevýhodou je problematické nabíjení, omezená životnost a možná údržba.

Na trhu je velká řada různých akumulátorů, které se od sebe liší provedením, elektrolytem a elektrodami. Nejznámější typem akumulátoru je olověný, který se nachází třeba v automobilech. V moderních aplikacích olověné akumulátory bývají nahrazeny akumulátory, které mají lepší poměr kapacity k hmotnosti, ale nejsou schopny omezenou dobu dodat tak velký proud jako olověné akumulátory. [4]



Obrázek 2.9: Ilustrační fotografie provedení baterie

## 2.3 Základní parametry zátěže (spotřebiče)

Velmi důležitá pasáž pro návrh elektroniky. Je třeba specifikovat všechna potřebná napětí pro spotřebič. Dále je třeba určit maximální a trvalý proudový odběr pro jednotlivé napěťové větve.

Také je třeba vědět, jestli je dodávka elektrické energie nutná za všech okolností, nebo se s výpadkem energie počítá. Jaká je maximální doba, kterou má systém nabíhat, jak dlouho má energii dodávat po výpadku primárního zdroje.

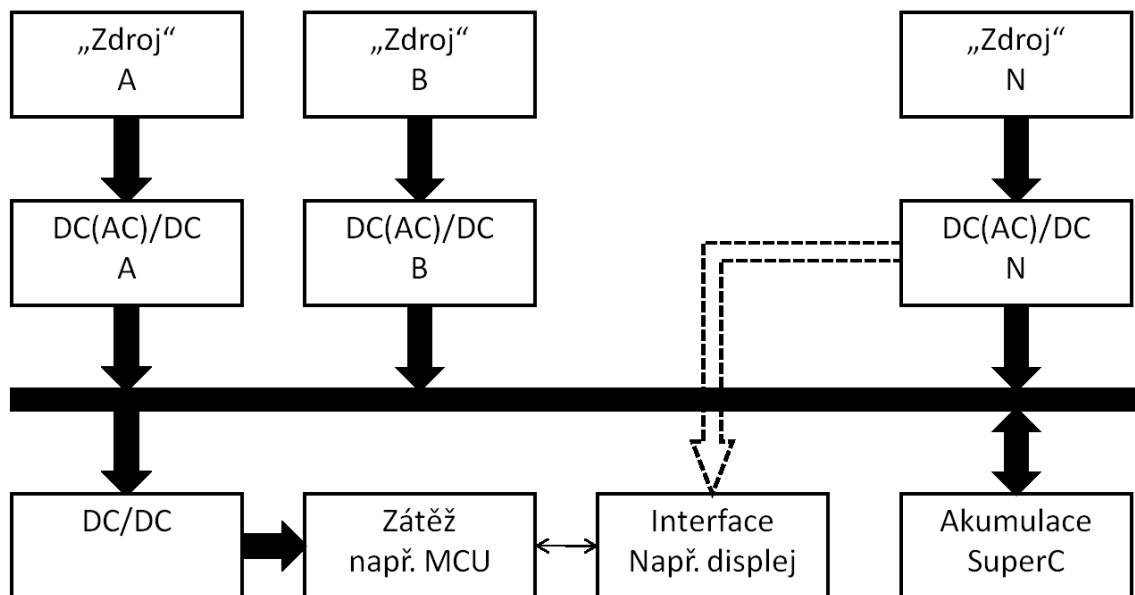
### 3 Návrh původního napájecího systému

Pro návrh je nutné znát parametry zdroje a zátěže, ke zvolení vhodné topologie je nutné znát charakter zátěže a charakter dodávky elektrické energie.

Parametry zdroje jsou jeho minimální a maximální výstupní napětí, jeho charakter polarity, jestli je výstupní napětí střídavé, nebo stejnosměrné, zda mění polaritu. Další rozhodujícím faktorem je výstupní proud a vnitřní odpor zdroje. Ideální je znalost celé zatěžovací charakteristiky zdroje (závislost výstupního napětí na odebíraném proudu). Znalost převodní charakteristiky (závislost výstupního napětí na vstupní veličině např. teplotním rozdílu na termočlánu) je dobrá pro optimalizaci zařízení, ale není nezbytně nutná pro prvotní návrh.

Parametry zátěže jsou obdobné jako u zdrojů. Je nutné znát napájecí napětí. Zdáli dostačuje jedna napájecí hladina, nebo spotřebič potřebuje více hladin (např. jedna hladina pro jednočipový mikropočítač a druhá hladina pro A/D převodník). Jaká je tolerance napájecího napětí, jak velká může být střídavá a šumová složka (zvlnění) napájecího napětí. Dále je nutné znát trvalý odebíraný proud, maximální odebíraný proud a po jakou dobu je tento maximální proud vyžadován.

Po analýze požadavků zadavatele byla vytvořena koncepce napájení, která obsahuje více možných zdrojů, tedy i DC/DC měničů, jeden akumulací prvek a hlavní výstupní DC/DC měnič, vše zobrazuje obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Zvolená topologie napájení

### 3.1 Určení parametrů spotřebiče

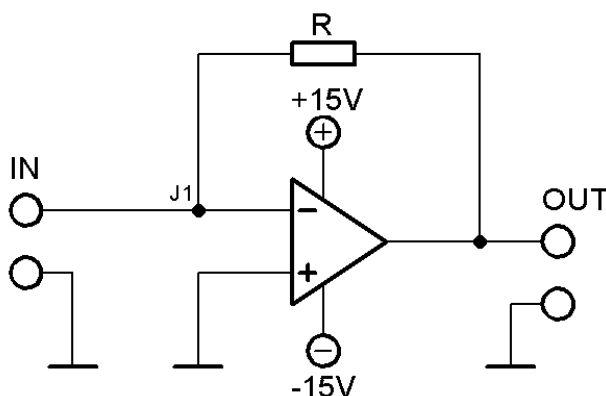
Pro určení vlastností spotřebiče je třeba provést měření spotřeby jednotlivých komponentů výsledného zapojení. K tomuto účelu bylo nutné vytvořit měřicí přípravek, aby se urychlilo zjišťování spotřeby.

#### 3.1.1 Přípravek pro měření spotřeby

Přípravek funguje jako převodník proudu na napětí pro možnost měření proudu osciloskopem, dále obsahuje dva A/D převodníky, jeden pro měření napětí (napájecího) a měření odebíraného proudu. Vše vyhodnocuje jednočipový mikropočítač doplněný o displej (LCD), na kterém se zobrazí změřené údaje.

Nejjednodušší měnič proudu na napětí je rezistor, protože podle Ohmova zákona je napětí na rezistoru úměrné procházejícímu proudu, ale je nutné zajistit, aby odpor byl co nejvíce konstantní. Ideální ampérmetr má nulový vnitřní odpor, proto tento převodník není vhodný pro malé proudy při velkém výstupním napětí. Možností je použít rezistor o malé hodnotě. Pokud má mít výstupní napětí vhodnou velikost, je nutné použít zesilovač. Ale návrh a konstrukce přesného měřicího zesilovače je náročná.

Jinou možností je použití operačního zesilovače (OZ) a jeho zpětnovazební obvod. OZ je zesilovač s velmi vysokým zesílením a většinou diferenčním vstupem, má invertující a neinvertující vstup. OZ zesiluje napětí (napěťový rozdíl) mezi jednotlivými vstupy. Zpětnou vazbou obecně omezujeme zesílení, které závisí při velkém zesílení OZ pouze na vlastnostech zpětné vazby. Zjednodušeně lze činnost s OZ se zpětnou vazbou popsat tak, že OZ se snaží, aby rozdíl napětí na vstupech byl nulový, reálně je napěťový rozdíl v řádech  $\mu\text{V}$ .



Obrázek 3.2: Principiální schéma převodníku  $I/U$

Princip převodníku proudu na napětí z obrázku 3.2 je velmi jednoduchý. Za předpokladu ideálního OZ, ideální OZ má nekonečný vstupní impedanci (vůči zemi i vůči vstupům), je výstupní impedance nulová. Proud  $I$  vstupuje do uzlu  $J_1$ . Díky nekonečnému vstupnímu odporu je proud tekoucí do vstupu nulový. Proud  $I$  teče celý přes rezistor, jak je uvedeno výše, OZ se snaží udržet si stejný potenciál na obou vstupech, na neinvertujícím vstupu je nulový potenciál, díky ideálnímu OZ je na invertujícím vstupu také nulový potenciál.

Na základě znalosti směru proudu, velikosti odporu a hodnotě potenciálu lze získat následující vztah:

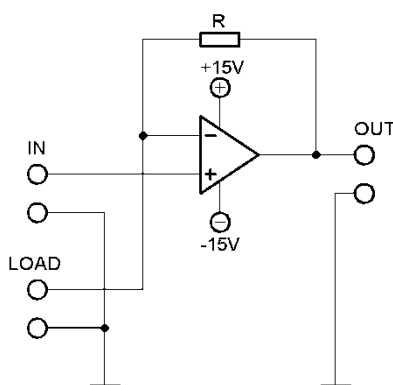
$$U_{OZ} = -R \cdot I, \quad (3.1)$$

kde  $U_{OZ}$  je výstupní napětí OZ [ $U_{OZ}$ ] = V,

$R$  je odpor snímacího rezistoru [ $R$ ] =  $\Omega$ ,

$I$  je měřený proud [ $I$ ] = A.

Vstupní odpor převodníku je nulový, protože na vstupu je nulový potenciál. Nevýhoda tohoto uspořádání je, že výstupní napětí je opačné polarity, je nutné použít ještě jeden zesilovač s OZ v invertujícím zapojení. Pokud by nulový potenciál zapojení byl nulovým potenciálem měřeného obvodu, je možné měřit pouze proud tekoucí do země.



Obrázek 3.3: Upravené zapojení převodníku I/U

Pro omezení nevhodných vlastností prvního zapojení je třeba zvolit jinou koncepci. Zvolilo se zapojení převodníku na obrázku 3.3. Kde se napájecí napětí přivede na neinvertující vstup, napájecí proud a napětí potřebné pro spotřebič se odebírá přímo z invertujícího vstupu. Jinak řečeno z napájecího zdroje teče do převodníku nulový proud. Energii potřebnou pro spotřebič dodává převodník (přesněji OZ). Výstupní napětí OZ lze určit na základě následujícího vztahu:

$$U_{OZ} = U_{CC} + R \cdot I, \quad (3.2)$$

kde  $U_{OZ}$  je výstupní napětí OZ [ $U_{OZ}$ ] = V,

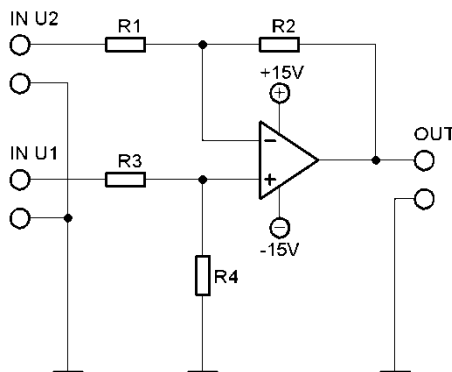
$U_{CC}$  je napájecí napájení pro měřený předmět [ $U_0$ ] = V,

$R$  je odpor snímacího rezistoru [ $R$ ] =  $\Omega$ ,

$I$  je měřený proud [ $I$ ] = A.

Ze vztahu je patrné, že výstupní napětí má superponovanou hodnotu napájecího napětí, což lze považovat za adjektivní chybu. Tuto chybu lze omezit tím, že měření napětí se provádí přímo na snímacím rezistoru. Pro náš účel se tento postup nehodí, protože je nutné měřit proti společné zemi (osciloskopem se měří proud i napájecí napětí). Pokud by se převodník používal

pouze s A/D převodníkem a jednočipovým mikropočítačem, stačilo by v mikropočítači jednotlivá napětí od sebe odečíst. Ale výstup z převodníku má být i analogový, je nutné napětí odečíst analogově, tomuto zadání nejvíce vyhovuje rozdílový zesilovač se zapojením OZ, takové zapojení je zobrazeno na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Schéma rozdílového (diferenčního) zesilovače

Pro diferenční zesilovač lze zapsat následující vztah, pokud platí  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ :

$$U_{OZ} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_1 - U_2), \quad (3.3)$$

kde  $U_{OZ}$  je výstupní napětí OZ [ $U_{OZ}$ ] = V,

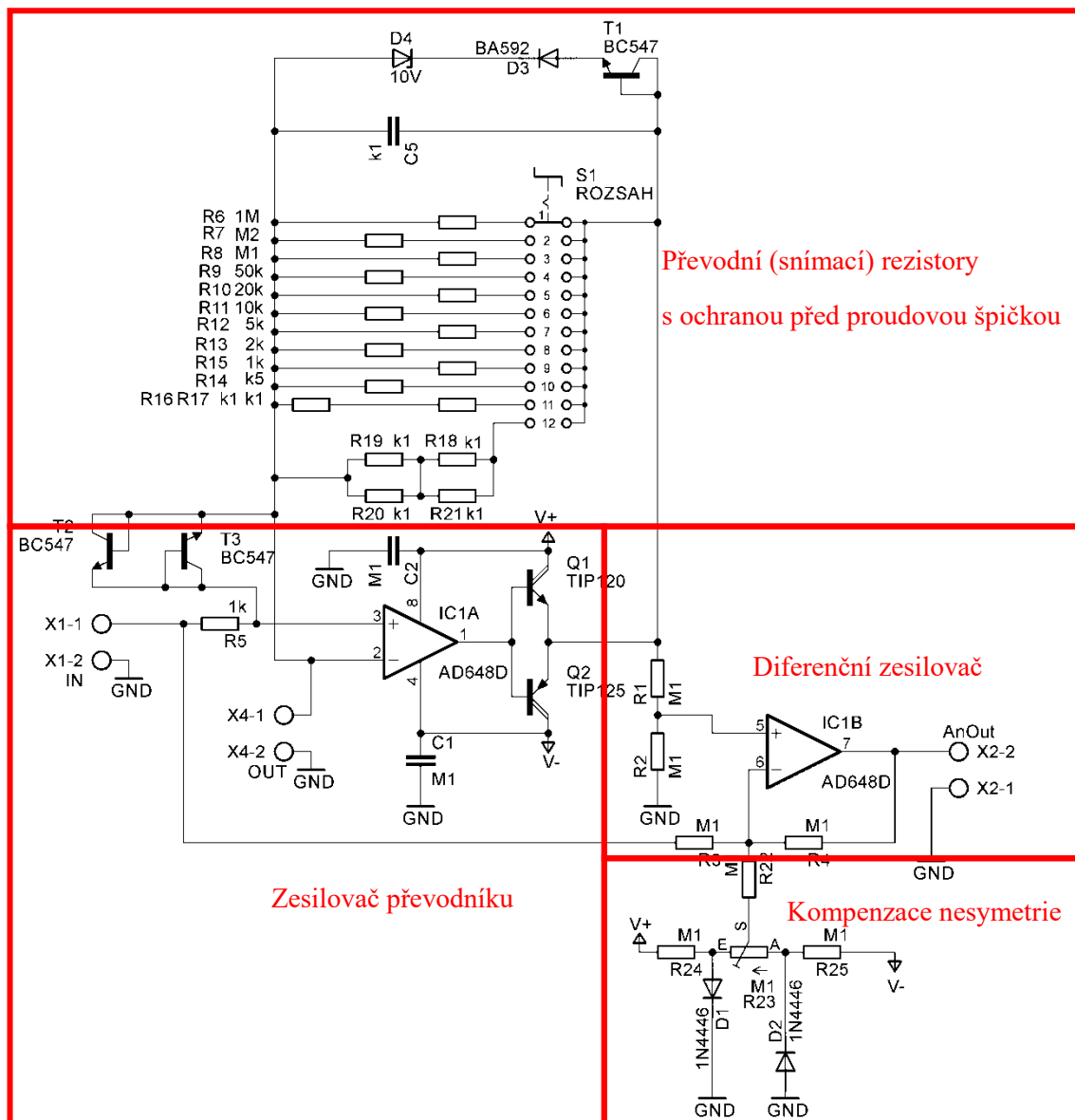
$R_2$  je hodnota odporu zpětnovazebního odporu [ $R_2$ ] =  $\Omega$ ,

$R_1$  je hodnota odporu vazebního rezistoru [ $R_1$ ] =  $\Omega$ ,

$U_1$  je přivedené napětí na první vstup [ $U_1$ ] = V,

$U_2$  je přivedené napětí na druhý vstup [ $U_2$ ] = V.

Správné zapojení diferenčního zesilovače je zapojení první vstupu na výstup OZ převodníku a zapojení druhého vstupu na invertující vstup OZ převodníku. Výstupem diferenčního zesilovače je napětí přímo na snímacím rezistoru. Nevýhodou tohoto konceptu je ovlivnění proudu přes snímací rezistor, protože jím teče proud i do diferenčního zesilovače, proto byl zvolen jiný koncept zapojení. V rámci nově zvoleného konceptu byl oproti prvnímu návrhu připojen vstup diferenčního zesilovače na neinvertující vstup. Vychází se z úvahy, že napěťový rozdíl mezi vstupy je nulový, proto je možné zaměnit vstupy. Výsledné zapojení pro jeden rozsah je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Výsledné schéma převodníku I/U

Zapojení je doplněno o ochranné diody. Diodová větev ve zpětné vazbě zajišťuje překonání malých proudových špiček. Příkladem je měřena EEPROM, při klidovém provozu odebírá minimální proud a je nastaven nejcitlivější rozsah. Najednou se začnou ukládat data do paměti, proud několikanásobně vzroste, není možné tak rychle přepnout rozsah přípravku, proto by mohlo dojít k chybě. Proto při takovém stavu nadměrný proud proteče přes diody, nedojde k chybě ukládání.[13],[14]

### 3.1.2 Měření parametrů spotřebičů

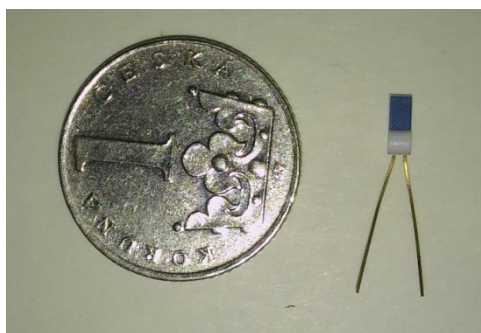
Pomocí převodníku se odměřily základní parametry jednotlivých součástek, které jsou předpokládány na budoucí použití v systému. Potřebné napětí bylo stanoveno na 3,3 V a maximální trvalý odběr 5 mA a špička 20 mA.

## 3.2 Návrh měniče pro zdroj z tepla

V první řadě je nutné zjistit parametry termoelektrických generátorů, popř. termoelektrických chladičů. Bohužel většina katalogů uvádí hodnoty pro teplotní rozdíly od 100 °C. U zdroje se obecně měří zatěžovací charakteristika, u termoelektrických článků jednotlivé zatěžovací charakteristiky pro konstantní teplotní rozdíl.

### 3.2.1 Návrh měřícího přípravku pro zdroj z tepla

Bylo zapotřebí vytvořit vhodný měřící přípravek, pro nastavení konstantního teplotního rozdílu mezi jednotlivými stranami TEG(C) článku. Byly zvoleny dva duralové profily („chladiče“), do kterých se pomocí CNC frézky vyfrézovaly drážky pro uložení subminiaturních platinových odporových čidel PT1000. Jeden z chladičů je elektronicky vyhříván pomocí tranzistorů a výkonového rezistoru, aby se dosáhlo zadaného teplotního rozdílu.



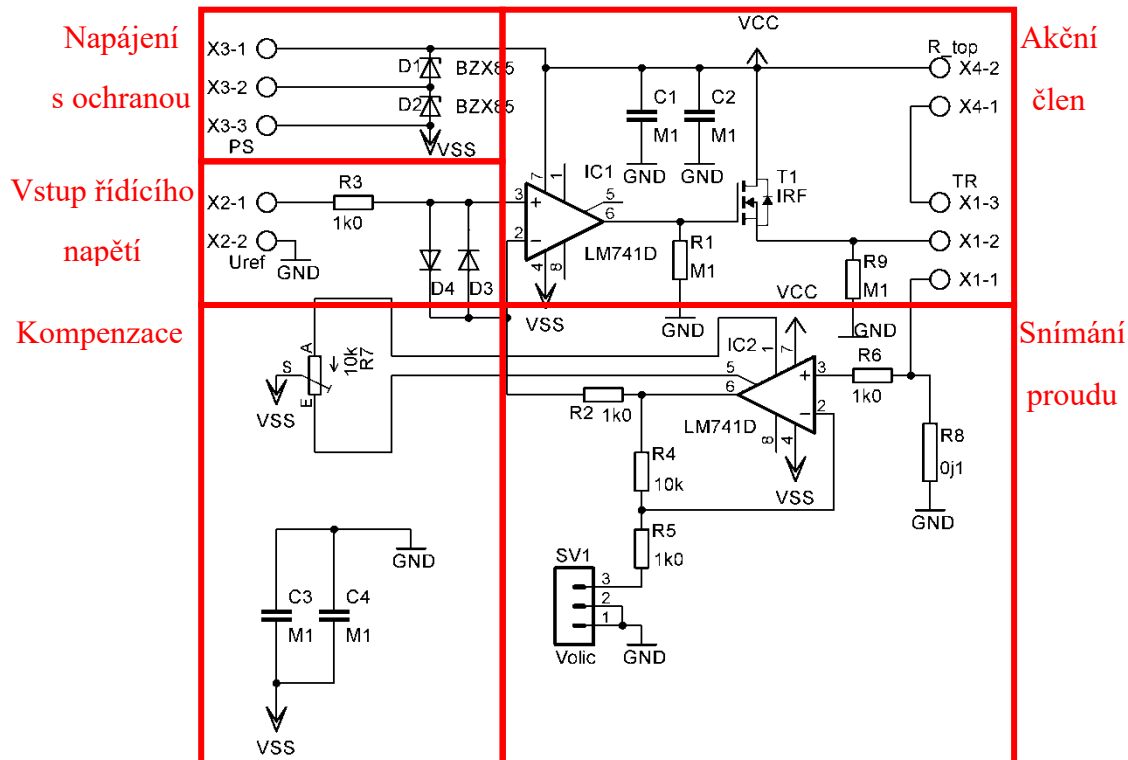
Obrázek 3.6: Teplotní čidlo PT1000 (porovnání velikosti s mincí)



Obrázek 3.7: Drážka v profilu pro PT1000



Výkonový tranzistor a rezistor jsou buzeny pomocí budiče, který funguje jako zdroj konstantního proudu. Budič je napájen ze symetrického zdroje  $\pm 15$  V s maximálním proudem 3 A. Budič je osazený dvěma operačními zesilovači LM741 (MAA741, UA741, TL081 apod.) a budícím MOSFET tranzistorem IRL014. Zapojení budiče je na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Schéma budiče výkonového tranzistoru a rezistoru

Výstupní výkon je ovládán stejnosměrným napětím v rozsahu 0 až 5 V. Proud protékající výkonovým odporem a tekoucí kolektorem výkonového tranzistoru lze určit podle vztahu:

$$I = \frac{U_{ref}}{R_{sen} \cdot A_U}, \quad (3.4)$$

kde  $I$  je proud  $[I] = A$ ,

$U_{ref}$  je referenční napětí  $[U_{ref}] = V$ ,

$R_{sen}$  je hodnota odporu snímacího odporu  $[R_{sen}] = \Omega$ ,

$A_U$  je hodnota zesílení IC2  $[A_U] = -$ .

Je patrné, že oba prvky jsou v sérii. Je tedy výkon ohřevu definován vztahem:

$$P = U_+ \cdot I = \frac{U_+ \cdot U_{ref}}{R_{sen} \cdot A_U}, \quad (3.5)$$

kde  $P$  je výkon  $[P] = W$ ,

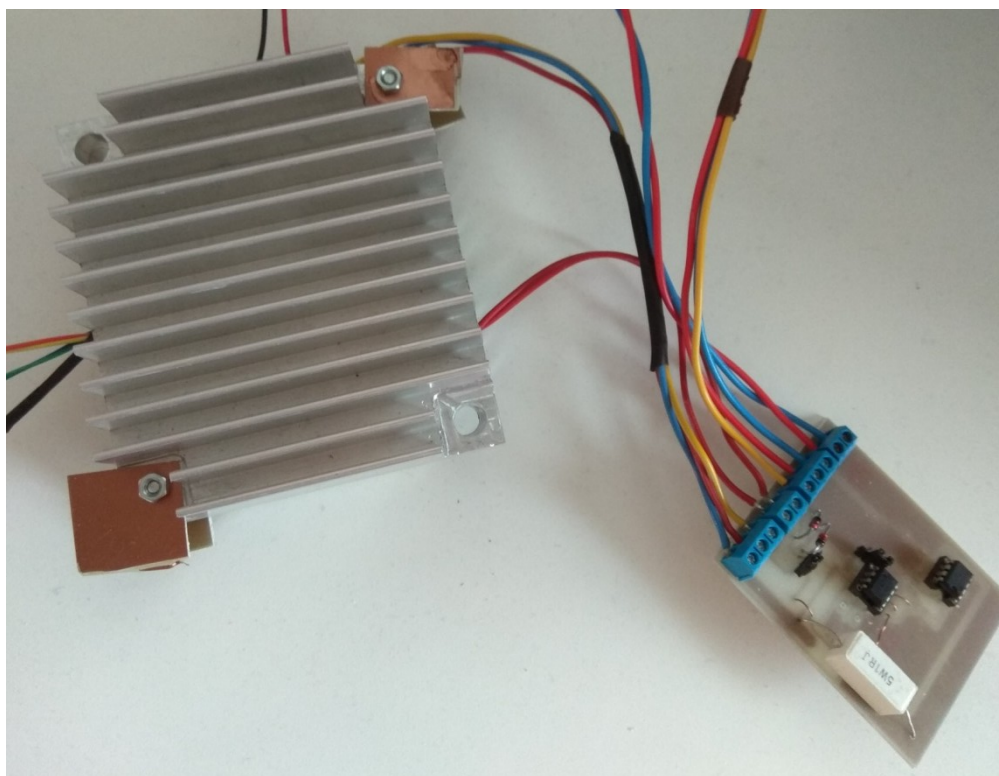
$U_+$  je kladné napětí, které dodává zdroj  $[U_+] = V$ ,

$I$  je proud  $[I] = A$ ,

$U_{ref}$  je referenční napětí  $[U_{ref}] = V$ ,

$R_{sen}$  je hodnota odporu snímacího odporu  $[R_{sen}] = \Omega$ ,

$A_U$  je hodnota zesílení IC2  $[A_U] = -$ .

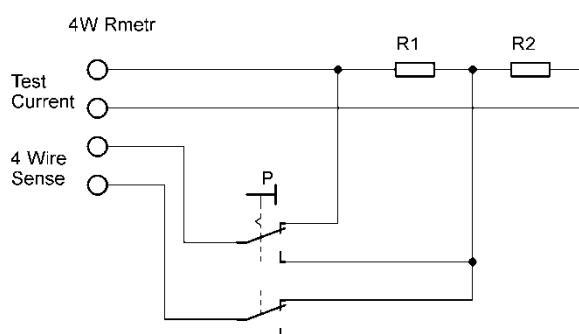


Obrázek 3.9: Přípravek pro měření TEG(C) článků

### 3.2.2 Metodika měření a analýza parametrů zdroje z tepla

Je nutné změřit TEG(C) články při malých teplotních rozdílech. Z těchto důvodů bylo vybráno teplotní čidlo PT1000 ve třídě A, pro přesné měření odporu čidla bylo zvoleno čtyřvodičové měření, které eliminuje odpor měřicího vedení. Dvě svorky fungují jako proudový zdroj s konstantním proudem (většinou 1 mA) a další dvě svorky mají funkci voltmetru (podle Ohmova zákona je napětí na rezistoru úměrné proudu, je-li konstantní proud, tak napětí odpovídá odporu).

Z důvodů dispozice pouze jednoho multimetru s rozhraním GPIB, bylo třeba vytvořit měřicí zapojení pro měření dvou čidel PT1000 jedním multimetrem. První úvaha směřovala k můstkovému zapojení, toto zapojení se při tak malých teplotních gradientech ukázalo jako špatné (minimální, či vůbec žádný rozdíl signál-šum). Optimální zapojení je zobrazeno na obrázku 3.10.



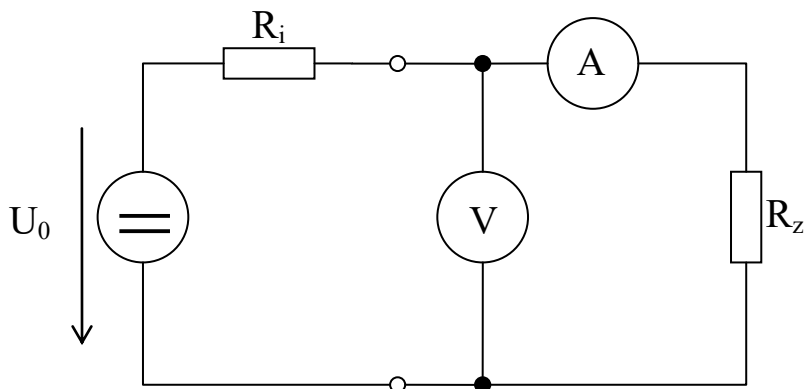
Obrázek 3.10: *Principiální zapojení měření odporu dvou čidel PT1000*

V prvním taktu se změří odpor prvního čidla (R1), následně se přepne přepínač P do druhé polohy a v tomto taktu se změří odpor druhého čidla (R2), opět se přepne přepínač P do první polohy a děj se opakuje. Je pravdou, že nejsou teploty měřeny současně, ale s časovým posunem, protože je časová konstanta chladiče okolo 20 minut. Chyba způsobena tímto časovým posunem je zanedbatelná. Pro automatizaci měření se přepínač nahradil relé, které je ovládáno pomocí platformy Arduino UNO. Arduino UNO je ovládáno přes prostředí LabView (chová se jako měřicí karta). Budič topného systému je ovládán napětím, které je získáno jednoduchým D/A převodníkem z PWM pinu. Měření a regulace teploty je zajišťováno pomocí aplikace v LabView, která změří odpor čidel, převede odpor na teplotu, uloží žádaná data na disk a stíhá pomocí jednoduché stavové regulace udržet žádaný teplotní rozdíl.

Stavová regulace funguje velice jednoduše, při velké regulační odchylce je maximální topný výkon. Pokud je odchylka v rozmezí 0 K až 1 K je topný výkon poloviční. Jinak je topný výkon nulový.

Později bylo užito druhého multimetru pro měření odporu druhého článku, měřením se ukázalo, že chyba mezi jednotlivými metodami měření se liší nanejvýše o 1 %, proto se měření pro první sérii článků neopakovalo.

Na obrázku 3.11 je zobrazeno principiální měřicí schéma pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje.

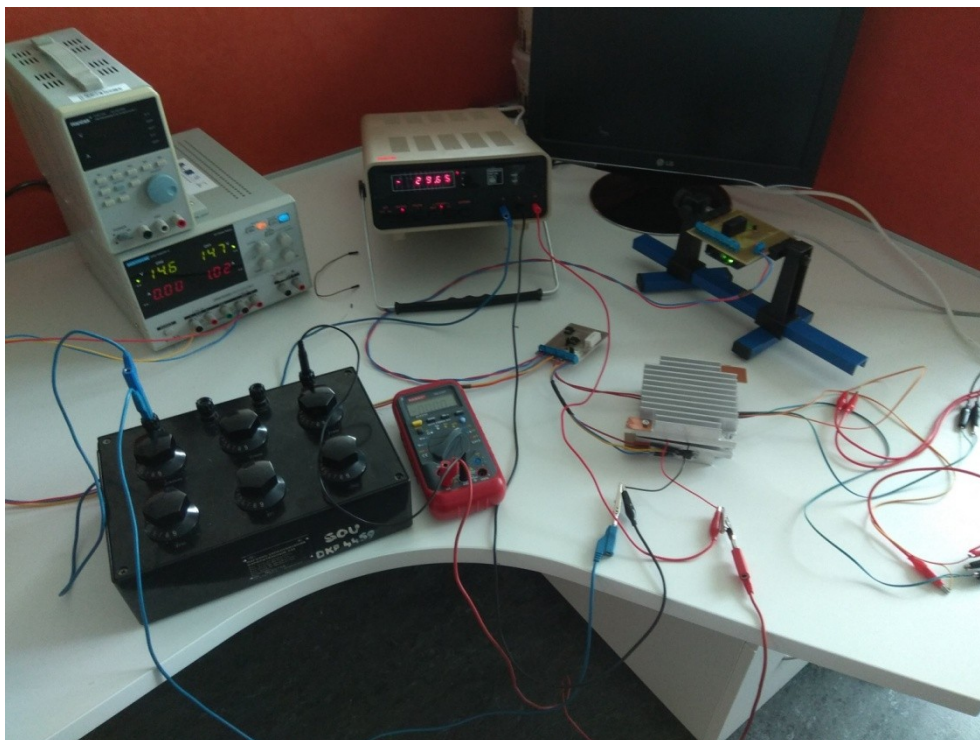


Obrázek 3.11: Měřicí schéma pro měření zatěžovací charakteristiky

Tabulka 3.1: Použité měřicí přístroje pro měření zatěžovací charakteristiky TEG(C) článků

Označení	Výrobce	Výrobní nebo inventární číslo	Použití
34401	Agilent	i. č. 50000008650	Měření odporu
2000	KEITHLEY	i. č. 023953 (454 312/79)	Měření odporu
M1T330	METRA Blansko	v. č. 4388005	Voltmetr
RE330F	RANGE	v. č. 12050043	Ampérmetr
Odporová dekáda R33	ZIP	v. č. 00788	Zatěžovací odpor

Postup měření spočívá v dosažení žádaného teplotního rozdílu. Následně se odečte napětí naprázdno (je připojen pouze voltmetr). Poté se připojí ampérmetr se zátěží. Odečte se napětí a proud, při daném nastaveném odporu. Odpor ampérmetru se přičítá k odporu dekády. Vstupní proud voltmetru, při rozsahu napětí do 30 V, je menší jak 1 nA, tedy chyba způsobena tímto proudem je minimální. Je vhodné provést zapojení pomocí čtyř vodičů, tak aby první dvojice propojovala výstup článku s voltmetrem a druhá dvojice propojovala výstup článku se zátěží s ampérmetrem. Tímto zapojením se eliminuje chyba vodičů.

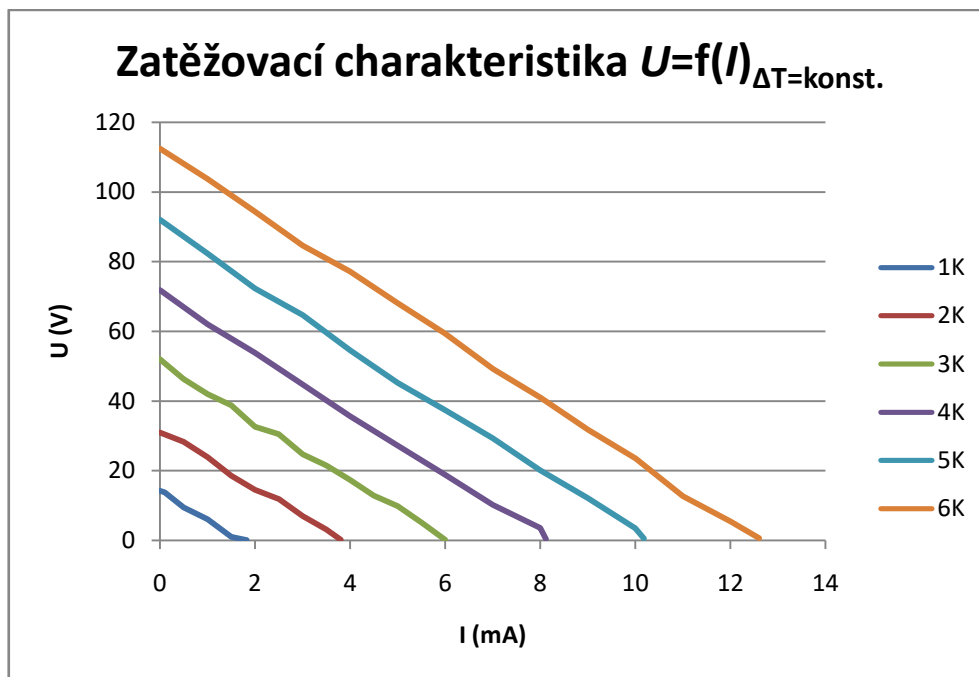


Obrázek 3.12: *Ukázka měřícího pracoviště*

Z naměřených dat se vypočte zatěžovací odpor podle Ohmova zákona, dále se vypočte vnitřní odpor podle následujícího vzorce

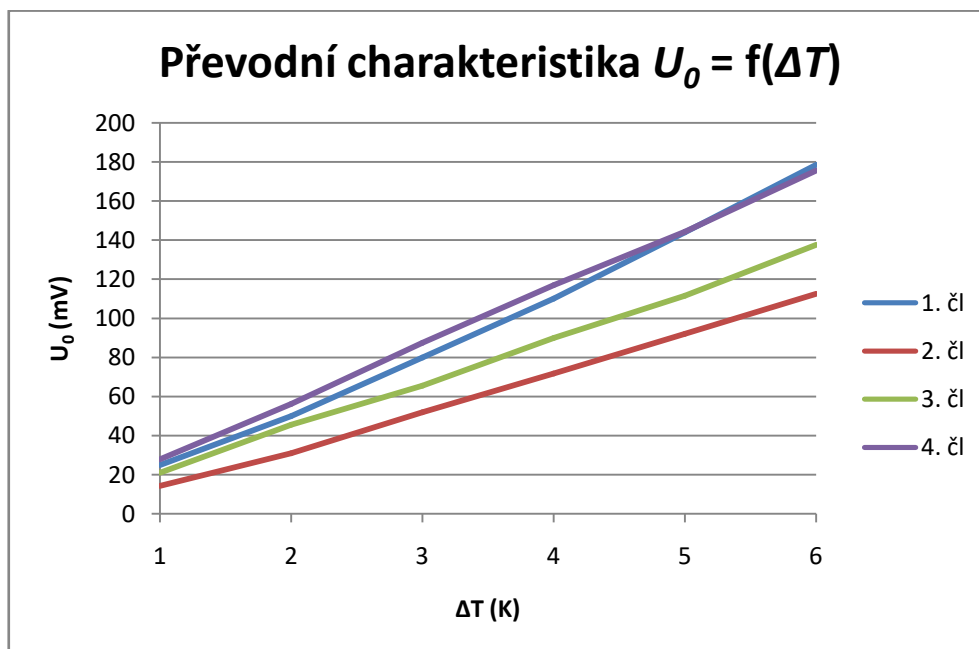
$$R_i = \frac{U_0 - U}{I}. \quad (3.6)$$

Naměřená vypočtená data se vhodně vynesou graficky. Zatěžovací charakteristika vypovídá o průběhu napětí při odebírání proudu, a jestli je možné zdroj jednoduše linearizovat. Další vhodnou charakteristikou je převodní charakteristika. Díky těmto parametrům je možné určit všechny potřebné parametry náhradního zdroje napětí, tedy napětí naprázdno, které je funkcí teplotního rozdílu, a vnitřní odpor.



Obrázek 3.13: Zatěžovací charakteristika 2. TEG článku

Na obrázku 3.13 je zobrazena zatěžovací charakteristika druhého TEG článku, zbylé převodní charakteristiky jsou uvedeny v přílohách (viz příloha A). Zatěžovací charakteristika má tvar přímky. Tvar přímky znamená konstantní vnitřní odpor článku. Jednotlivé přímky mají podobný sklon, z toho plyne, že vnitřní odpor není závislý na teplotě článků. Tedy jednoduchým zprůměrováním lze dosáhnout jednotlivé odpory.



Obrázek 3.14: Převodní charakteristika čtyř TEG článků

Na obrázku 3.14 je zobrazena převodní charakteristika pro všechny odměřené TEG články. Jednotlivé převodní charakteristiky lze proložit polynomem prvního, popř. druhého řádu. Všechny důležité parametry jsou shrnuty v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: *Přehled parametrů jednotlivých článků*

Číslo článku	Článek	Vnitřní odpor $R_i$ ( $\Omega$ )	Rovnice napětí naprázdno (mV)
1	TEG-127020	5,57	$U_0 = 1,134(\Delta t)^2 + 22,9\Delta t + 0,553$
2	TEG-127009	8,59	$U_0 = 19,83\Delta t - 7,164$
3	TES1-12703	9,74	$U_0 = 0,249(\Delta t)^2 + 21,26\Delta t + 0,304$
4	TES1-12704	10,89	$U_0 = 29,48\Delta t - 1,802$

Maximální výkon, který ze zdroje lze získat, je při přizpůsobení zátěže. Přizpůsobení znamená, že odpor zátěže je roven vnitřnímu odporu, v tomto okamžiku teče do zátěže maximální proud při maximálním napětí, účinnost je 50 %.

### 3.2.3 Analýza trhu DC/DC měničů

Na trhu je k dostání mnoho řídicích obvodů pro DC/DC měniče, ke kterým se připojí minimum pasivních součástek. Výstupní napětí z DC/DC měniče bylo stanoveno na 3,3 V. Z obrázku 3.14 je patrné, že minimální vstupní napětí se pohybuje okolo 20 mV.

Některé obvody mají integrovanou technologii označovanou jako MPPT (maximum power point tracking). MPPT je nejvýhodnější u solárních článků, které nemají lineární charakteristiku, která se dynamicky mění. MPPT automaticky přizpůsobuje DC/DC měnič ke zdroji, a tím dosáhnout maximálního možného výkonu, který lze ze zdroje získat.

Tabulka 3.3: Srovnání obvodů pro DC/DC měniče

Obvod		BQ25504	BQ25570	TP62737	LTC3108
Parametr					
Typ (Step-)		UP	UP/DOWN	DOWN	UP
Výrobce		Texas Instruments	Texas Instruments	Texas Instruments	Linear Technology
Minimální vstupní napětí (V)		0,13	0,1	2	0,02
Výstupní napětí (V)		2,5 až 5,25	2 až 5,5	1,3 až 5	2,35;3,3;4,1;5
Klidový proud (nA)		<330	<488	<380	<900
MPPT		ANO	ANO	NE	NE
Super C		ANO	ANO	NE	ANO
Baterie		ANO	ANO	NE	NE
Pouzdro		VQFN16	VQFN20	VQFN14	SSOP16

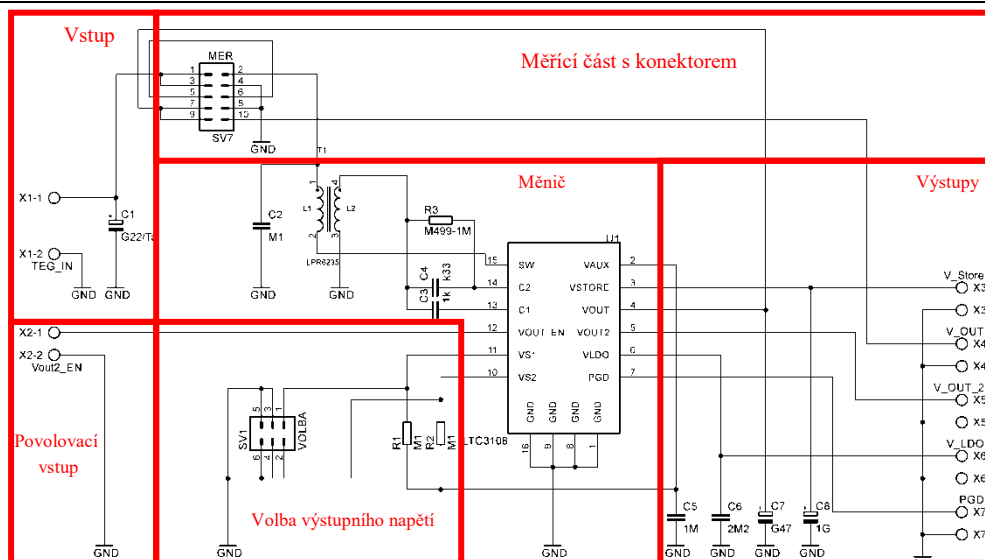
Z tabulky 3.3 je patrné, že pro analyzované TEG články se nejvíce hodí obvod od Linear Technology LTC3108, který je schopen pracovat od 20 mV. Jeho nevýhodou je chybějící MPPT.

### 3.2.4 LTC3108

LTC3108 pracuje s převodním transformátorem, který není galvanicky oddělený. Princip je založený na samokmitavém měniči se synchronním usměrňovačem. Výstupní napětí je programovatelné podle kombinace pinů VS2 a VS1 pro hlavní výstup. Obvod také obsahuje LDO (Low-dropout) regulátor s napětím 2,2 V a pomocí signálu  $V_{OUT2\_EN}$  lze spínat výstup OUT2, jehož napětí je odvozeno od hlavního napětí na pinu OUT (jsou si rovna).

Podle katalogu (viz [15]) je doporučeno volit napětí skladovacího kondenzátoru 6,3 V. Kapacita skladovacího kondenzátoru může být nulová, ale je doporučeno alespoň 100  $\mu\text{F}$ . Od velikosti kapacity se odvíjí i maximální doba, po kterou je obvod schopen dodávat energii při nečinnosti zdroje. Dále výrobce upozorňuje, že proud ze skladu energie je omezený na několik miliampér. Není schopen pokrýt velké proudové špičky.





Obrázek 3.15: Schéma měniče s LTC3108

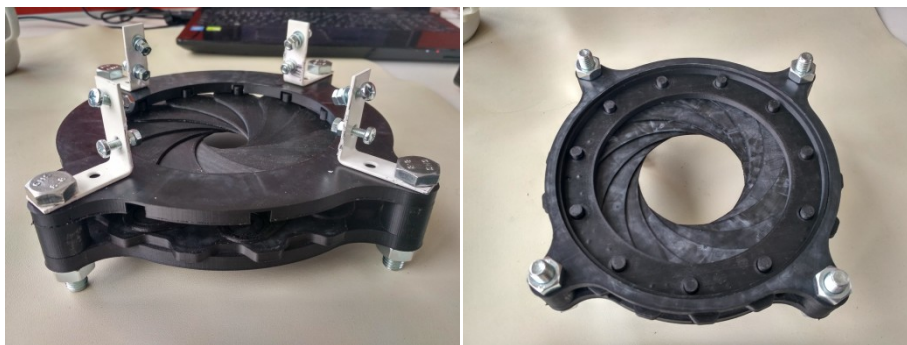
Výstupní napětí se volí pomocí zkratovacích spojek označovaných jako JUMPER. Na svorky X1 se připojuje TEG(C) články. K článku je paralelně zapojený tantalový kondenzátor o kapacitě 220  $\mu\text{F}$ . Vstup je s měničem spojený přes měřicí konektor, výstup z konektoru je blokován keramickým kondenzátorem o minimální kapacitě 100 nF. Vlastní zapojení je katalogové doporučení s vyvedením pro možné rozšíření (připojení periférií). Rezistor R3 nemusí být osazen, záleží na vlastnostech vazebního kondenzátoru C4. Připojením tohoto rezistoru se eliminují nežádoucí oscilace. Skladovací kondenzátor má kapacitu 1000  $\mu\text{F}$ , lze k němu paralelně připojit jiný kondenzátor pomocí svorek X3.

### 3.3 Návrh měniče pro zdroj ze světla

Obdobně jako u zdrojů z tepla je třeba zjistit vlastnosti jednotlivých solárních článků při různých zdrojích světla. Z budoucího použití je zřejmé, že solární články nebudou použity pro sluneční záření, ale záření z umělého osvětlení. Z těchto důvodů byly zvoleny různé zdroje světla (žárovky, úsporné žárovky, LED žárovky...).

#### 3.3.1 Měřicí přípravek pro zdroj ze světla

Přípravek umožňuje změnu intenzity světla pomocí optické clony, která byla vytisknuta na 3D tiskárně. Další možností změny intenzity osvětlení je regulace jasu jednotlivých zdrojů. U klasických žárovek se žhavým vláknem stačí měnit napájecí napětí. Změna napětí může být provedena pomocí regulačního autotransformátoru, nebo pomocí regulátoru s tyristorem, nebo triakem. U ostatních zdrojů světla je regulace jasu obtížná, protože obsahují přídavnou elektroniku, která do značné míry stabilizuje výstup.



Obrázek 3.16: Fotografie vytisknuté clony

### 3.3.2 Metodika měření a analýza parametrů zdroje ze světla

Postup a smysl je podobný. Měří se zatěžovací charakteristika při různých hodnotách světelné intenzity. Pro jednotlivé zatěžovací charakteristiky se musí intenzita osvětlení udržovat konstantní. K analýze byly zakoupeny dva solární články, jeden starší technologie a druhý technologie novější.

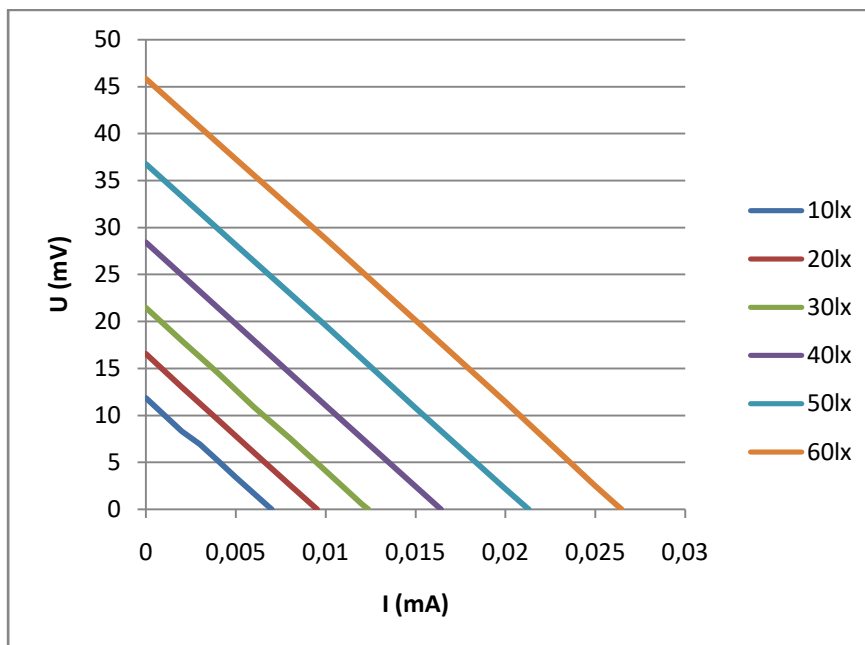
Tabulka 3.4: Použité měřicí přístroje pro měření zatěžovací charakteristiky solárních článků

Označení	Výrobce	Výrobní nebo inventární číslo	Použití
<b>M1T291</b>	METRA Blansko	v.č. 6420203	Ampérmetr
<b>MT100.0</b>	METRA Blansko	v.č. 25174	Voltmetr
<b>DT-86</b>	CEM	v.č. 141026809	Luxmetr
<b>Odporová dekáda R33</b>	ZIP	v.č. 00788	Zatěžovací odpor

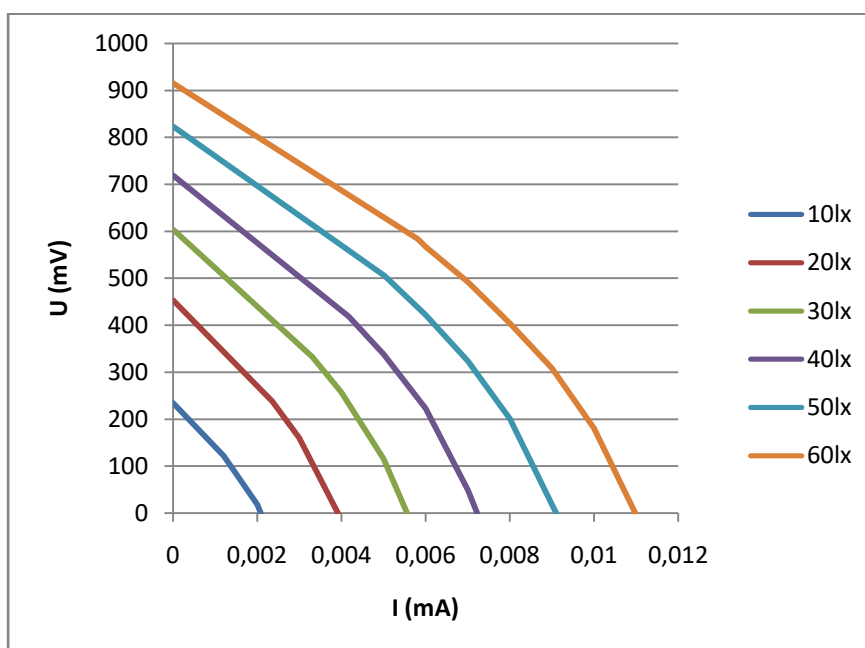


Obrázek 3.17: Ukázka pracoviště pro měření solárních článků

Číslicový voltmetr MT100.0 má vstupní proud menší jak 100 pA. Stejně jako MIT330 tedy neovlivňuje měření. Opět je připojení pomocí čtyř vodičů, kterými se eliminuje chyba způsobena odporem vedení. Kromě měření zatěžovací charakteristiky bylo provedeno měření spotřeby žárovky, aby nedošlo k záměně žárovek.



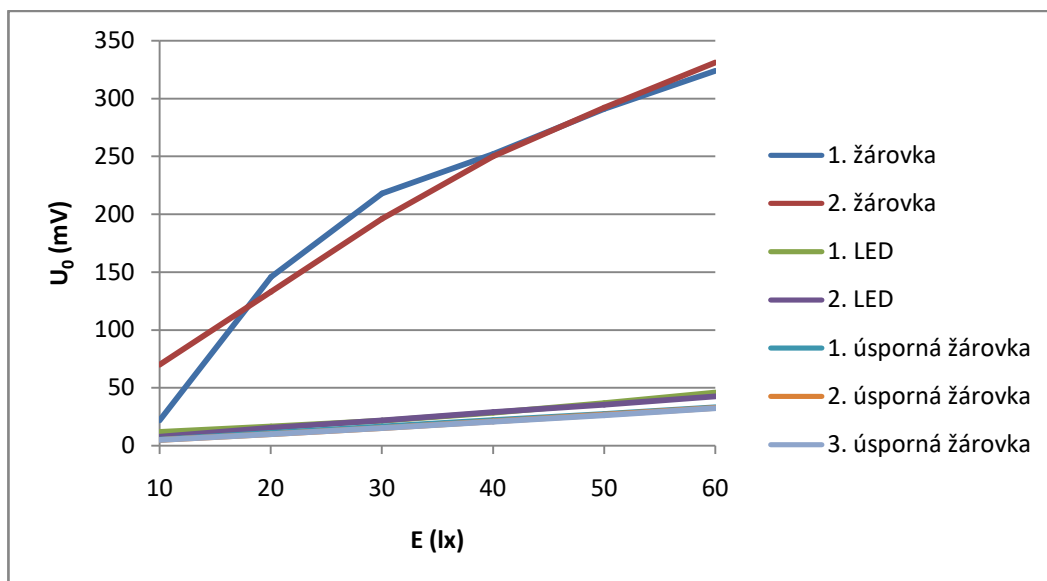
Obrázek 3.18: *Zatěžovací charakteristika 1. článku*



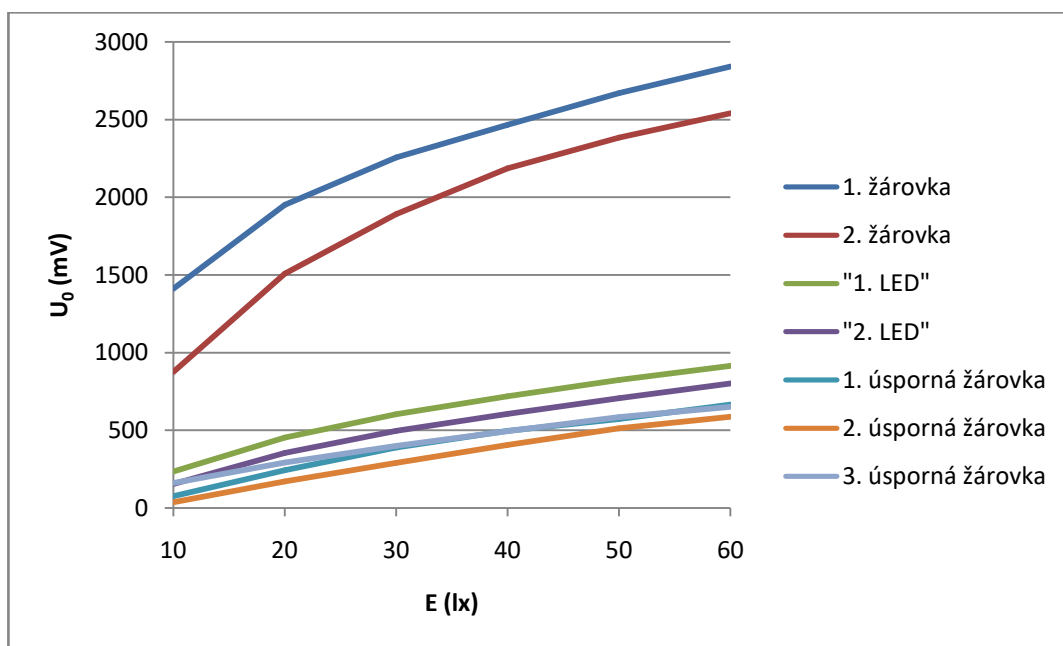
Obrázek 3.19: *Zatěžovací charakteristika 2. článku*

Ze zatěžovacích charakteristik zobrazených na obrázku 3.18 a obrázku 3.19 je zřejmé, že první solární článek dodává poměrně malé napětí. Charakteristika je lineární a lze ji

jednoduše linearizovat. Druhý článek dodává větší napětí, ale menší proud. Charakteristika druhého článku není lineární, tento typ charakteristiky je vhodný pro měnič s MPPT.



Obrázek 3.20: Převodní charakteristiky pro 1. článek



Obrázek 3.21: Převodní charakteristika pro 2. článek

Z měření je patrné, že nejlepším zdrojem světla jsou klasické žárovky se žhaveným vláknem. Důvodem proč žárovky dopadly natolik dobře, je fakt, že solární články jsou konstruovány pro sluneční svit, a žárovky mají spektrum vyzařování nejvíce podobné Slunci. Články jsou zjevně méně účinné na spektra s dominantní modrou složkou.

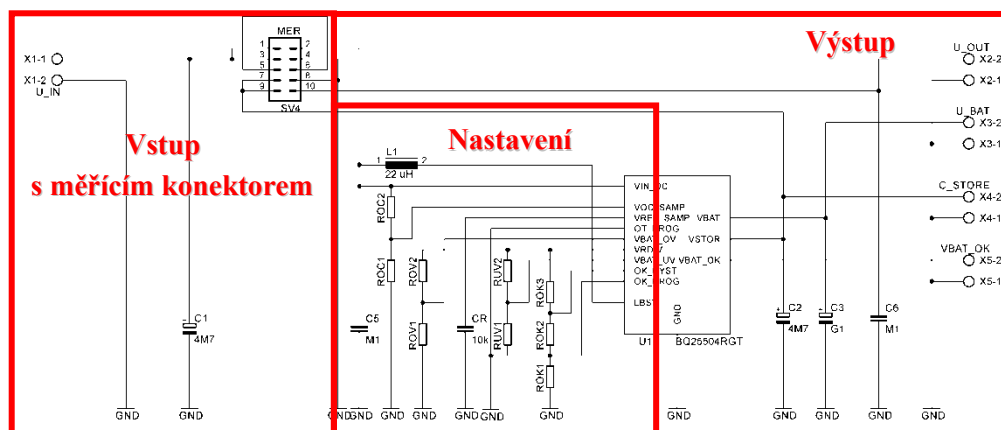
Na základě analýzy trhu bych volil pro první článek DC/DC měnič s LTC3108, pro druhý článek se nabízí obvody s MPPT. TP62737 od Texas Instruments je nevhodný, protože se jedná o snižující měnič. BQ25504 a BQ25570 jsou lepšími obvody.

### 3.3.3 BQ25504

BQ25504 je zvyšující měnič s možností připojení baterie. Pokud není baterie zapojena, je podle katalogu (viz [16]), vhodné připojit kondenzátor s minimální kapacitou 100  $\mu\text{F}$ . Všechny parametry obvodu jsou nastaveny pomocí čtyř odporových děličů. Výpočet jednotlivých hodnot odporů lze využít aplikaci od výrobce obvodu. Pomocí této aplikace a zadaných parametrů byly stanoveny hodnoty odporu jednotlivých rezistorů.

$$\begin{aligned} R_{OV1} &= 5,9 \text{ M}\Omega & R_{OV2} &= 4 \text{ M}\Omega \\ R_{UV1} &= 5,7 \text{ M}\Omega & R_{UV2} &= 4,3 \text{ M}\Omega \\ R_{OC1} &= 9,9 \text{ M}\Omega & R_{OC2} &= 9,9 \text{ M}\Omega \\ R_{OK1} &= 4,4 \text{ M}\Omega & R_{OK2} &= 4 \text{ M}\Omega & R_{OK3} &= 1,6 \text{ M}\Omega \end{aligned}$$

Výstup měniče by měl být blokován filtračním kondenzátorem s malými ztrátami a minimální kapacitou 4,7  $\mu\text{F}$ .



Obrázek 3.22: Schéma měniče s BQ25504

Solární článek se připojuje na svorky X1, vstup je blokován elektrolytickým kondenzátorem o kapacitě 4,7  $\mu\text{F}$ . Přes měřicí konektor se energie ze zdroje dostane na vstup měniče. Vstup měniče je také blokován kondenzátorem o minimální kapacitě 100 nF. Kondenzátor určující vzorkování by měl mít hodnotu 10 nF. Výstup je na svorkách X2. Ke svorkám X4 je možné připojit skladovací kondenzátor. Ke svorkám X3 lze připojit vhodný akumulátor. Svorky X5 dávají řídicímu systému signál informující o správné činnosti měniče.

## 3.4 Měření vlastností superkapacitorů

U superkapacitorů nás nejvíce zajímá samovybíjení (svodový proud), jak rychle se nepřipojený superkapacitor sám vybije, jaký je průměrný svodový proud a jeho průběh. Většina výrobců ve svých katalozích udává svodový proud za určité časové období, vůbec neinformuje o průběhu napětí při samovybíjení.

### 3.4.1 Teoretický rozbor měření

Pro měření samovybíjení je nutné superkapacitor tzv. „zformátovat“ kondenzátor. Zformátování se provádí tak, že se kondenzátor připojí k zdroji elektrického napětí, které postupně roste na maximální hodnotu. Následně se kondenzátor vybije přes rezistor a postup minimálně jednou zopakuje. Po zformátování superkapacitoru, se superkapacitor nabije na jmenovité maximální napětí. Každý den se odečte pomocí přesného voltmetru napětí superkapacitoru, zaznamená se i čas, kdy byl vzorek pořízen.

Pro zjištění svodového proudu je nutné využít základní vztahy z předchozí kapitoly.

$$\Delta I = \frac{C}{t} \cdot (U_k - U_{k-1}), \quad (3.7)$$

kde  $\Delta I$  je změna proudu mezi jednotlivými vzorky  $[\Delta I] = A$ ,

$C$  je kapacita kondenzátoru  $[C] = F$ ,

$t$  je čas mezi jednotlivými vzorky  $[t] = s$ ,

$U_k$  je napětí současného vzorku  $[U_k] = V$ ,

$U_{k-1}$  je napětí minulého vzorku  $[U_{k-1}] = V$ .

Dalším důležitým parametrem superkapacitorů je ekvivalentní sériový odpor (ESR). ESR je ukazatel stavu a kondice superkapacitoru. Většina výrobců superkapacitorů doporučuje průběžné měření ESR v dané aplikaci. Pokud je změřené ESR dvojnásobné jmenovité hodnotě je superkapacitor vadný.

ESR se měří pomocí připojení superkapacitoru na zdroj konstantního proudu, který je v režimu spotřebiče. Před připojením „aktivní zátěže“ se změří hodnota napětí na superkapacitoru (naprázdno), následně se připojí zátěž a měří se čas, po který napětí klesá na určenou hodnotu  $U_{min}$  (většina výrobců doporučuje 0,1 V). Následně se odpojí zátěž a odečte se napětí. Lze zavést následující vztahy:

$$R_{ESR} = \frac{U_f - U_{min}}{I_d}, \quad (3.8)$$

kde  $R_{ESR}$  je ekvivalentní sériový odpor  $[R_{ESR}] = \Omega$ ,

$U_f$  je napětí na superkapacitoru 5 s po odpojení zátěže  $[U_f] = V$ ,

$U_{min}$  je minimální napětí na superkapacitoru s připojenou zátěží  $[U_{min}] = V$ ,

$I_d$  je vybíjející konstantní proud  $[I_d] = A$ .

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{U_{C0} - U_f}, \quad (3.9)$$

kde  $C$  je kapacita superkapacitoru [ $C$ ] = F,

$I_d$  je vybíjejší konstantní proud [ $I_d$ ] = A,

$t_d$  je čas vybíjení [ $t$ ] = s,

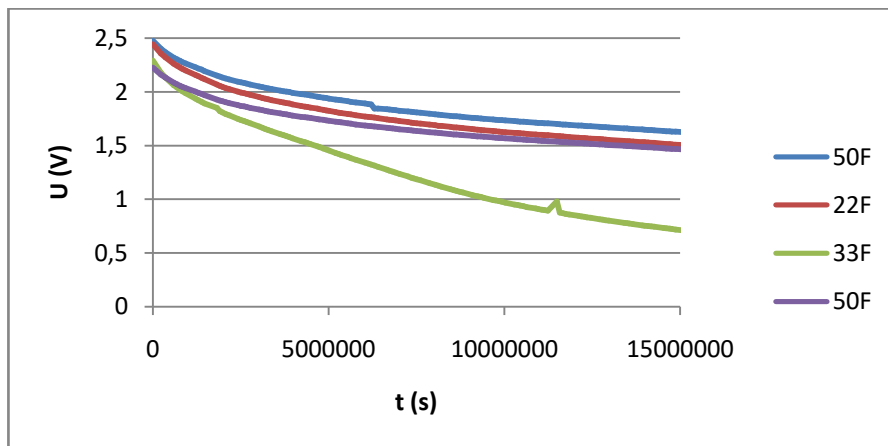
$U_{C0}$  je počáteční hodnota napětí na superkapacitoru [ $U_0$ ] = V,

$U_f$  je napětí na superkapacitoru 5 s po odpojení zátěže [ $U_f$ ] = V.

Pokud kapacita superkapacitoru klesne na 80 % jmenovité hodnoty, pokládá se superkapacitor za vadný. Pro superkapacitor, který je v pořádku, musí být splněny obě podmínky (podmínka velikosti kapacity a také podmínka ESR).

Měření by se mělo provádět při teplotě okolí 25 °C. Doporučuje se nastavovat zatěžovací proud na 20 % až 50 % proudu maximálního. Při vybíjení velkými proudy a opakovaným měřením se doporučuje superkapacitor chladit nucenou ventilací. Superkapacitor by se měl nabíjet zdrojem konstantního proudu, který má maximální výstupní napětí rovné napětí maximálnímu pro daný superkapacitor, aby nedošlo k jeho průrazu. Pro „přesné“ vypočtení kapacity se doporučuje vybit na 0,1 V. Pokud měření nemusí být přesné, jen orientační, může se vybit na jakoukoliv hodnotu (většina výrobců vybíjí do 50 % počáteční hodnoty).

### 3.4.2 Naměřené a vypočtené údaje



Obrázek 3.23: Průběhy napětí na měřených kondenzátorech

Tabulka 3.5: *Tabulka vypočtených průměrných hodnot svodového proudu*

C (F)	50	22	33	50
$\Delta I$ ( $\mu A$ )	2,758	1,305	3,599	2,415

Tabulka 3.6: *Srovnání vypočtených hodnot s katalogovými údaji*

C (F)	50	22	33	50
$\Delta I_{max} \left( \frac{\mu A}{72 h} \right)$	0,268	8,44	42,46	14,39
$\Delta I_{max \text{ katalogový }} \left( \frac{\mu A}{72 h} \right)$	160	60	-	180

### 3.5 Návrh výstupního měniče

Na základě zvolené topologie (viz obrázek 3.1 ) je třeba navrhnout také výstupní měnič. Podle stanovených parametrů je výstupní napětí 3,3 V a maximální proud 20 mA. Napětí superkapacitoru má trojúhelníkový průběh. Je vhodné použít měnič, který je schopen pracovat jako zvyšovač i snižovač, aby se využila maximální kapacita akumulárního prvku. Nejvhodnější obvod, který tyto parametry splňuje, je BQ25570 od Texas Instruments (katalog [17]).

BQ25570 je velmi podobný obvodu BQ25504. Pro výpočet hodnot odporu rezistorů byla použita aplikace výrobce.

$$R_{OV1} = 5,6 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OV2} = 7,35 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OUT1} = 4,7 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OUT2} = 8,2 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OK1} = 5,62 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OK2} = 5,49 \text{ M}\Omega$$

$$R_{OK3} = 1,8 \text{ M}\Omega$$



## 4 Realizace a verifikace vybraných DC/DC měničů

Ze získaných hodnot a naměřených charakteristik popisovaných v návrhu bylo zvoleno použití DC/DC měniče s LTC3108 pro zdroj z tepla jako vstupní DC/DC měnič. Měnič s BQ25504 byl zvolen jako vstupní měnič pro zdroj ze světla. Měnič s BQ25570 je výstupní měnič.

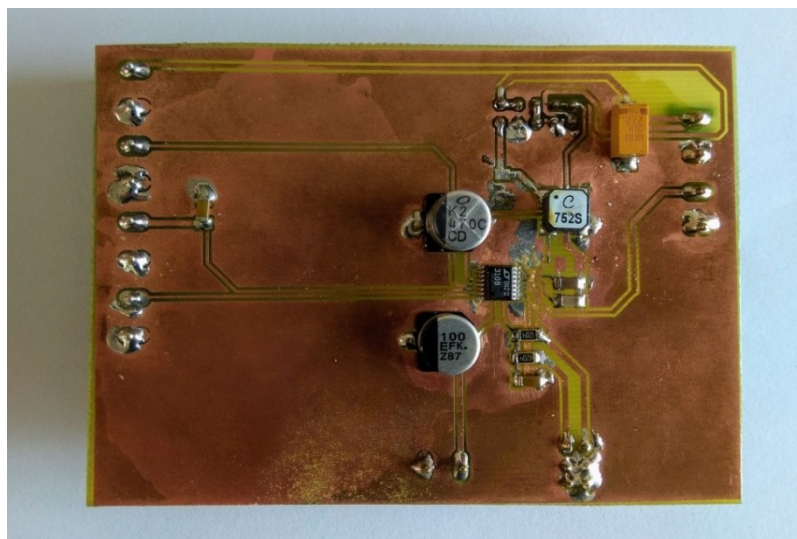
Jednotlivé DC/DC jsou vyrobeny na jednovrstvé desce plošných spojů (DPS) typu FR4. Zvolené odpory mají toleranci 1 %, anebo menší. Referenční kondenzátory u BQ255XX jsou také 1%. Ostatní kondenzátory mají toleranci  $\pm 10$  %. Pouzdro keramických kondenzátorů a rezistorů je 1206.

U měničů BQ je třeba dbát na to, aby ovládací rezistory měly co nejpřesnější hodnotu, která byla stanovena výpočtem. Z tohoto důvodu se přistoupilo k sériovému zapojení jednotlivých vybraných rezistorů. Po zapájení se multimetrem zkontroloval celkový odpor, jestli je správný.

### 4.1 Vstupní DC/DC měnič s LTC3108 pro zdroj z tepla

Měnič s LTC3108 vyžaduje ke své činnosti převodní transformátor. Byl vybrán transformátor s převodem 1:100, konkrétně LPR6235 od CoilCraft. Nejedná se o typ transformátoru doporučených výrobce, ale o jeho náhradu. Oproti výrobcem doporučovanému transformátoru má jinak zapojené vývody cívek. Z tohoto důvodu není možné přesné dodržení doporučení při návrhu desky.

Měnič je vyroben na jednovrstvé DPS s nosným materiálem FR4 s tloušťkou mědi 25  $\mu\text{m}$ . Byl vybrán obvod v provedení SSOP pro snadnější pájení součástí, dále DPS obsahuje tantalový kondenzátor s minimálními ztrátami. Rozměr DPS je 90x65 mm



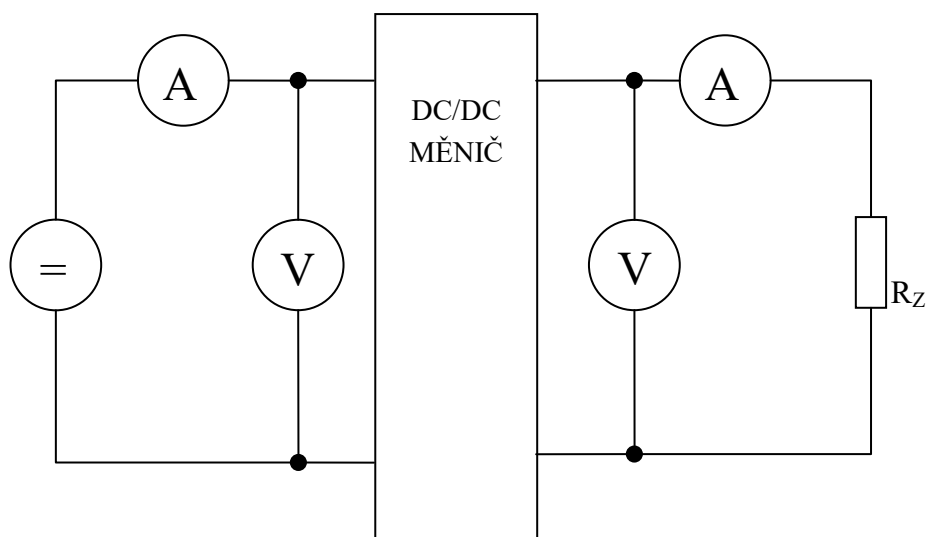
Obrázek 4.1: Fotografie vyrobené DPS s LTC3108

## 4.1.1 Měření parametrů

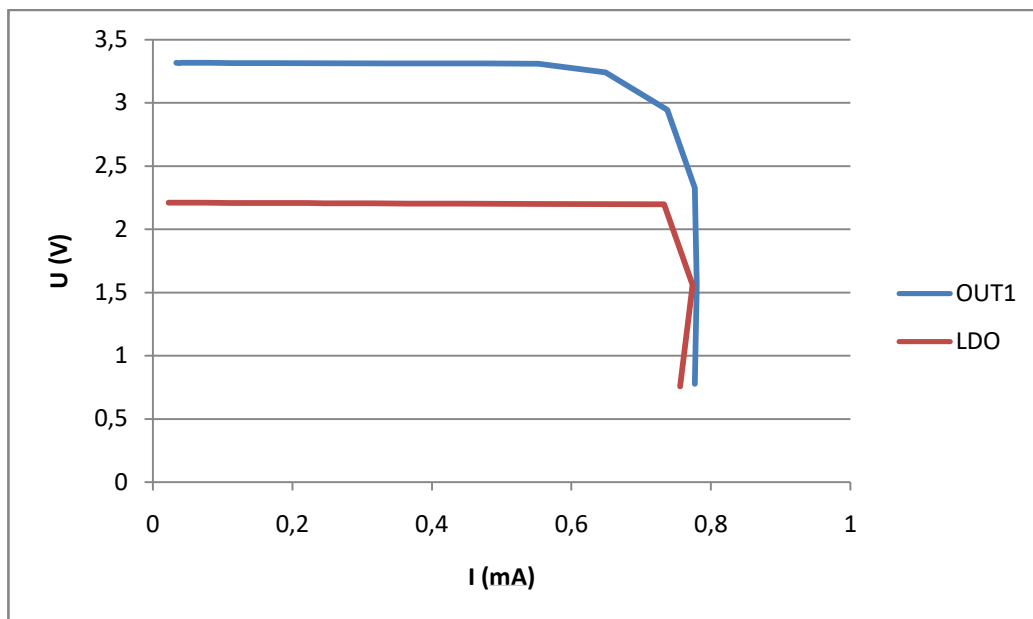
Cílem měřením je zjištění reálných hodnot a srovnání s hodnotami uvedenými v katalogu. Měří se zatěžovací charakteristika podobně jako u zdrojů popsaných výše, ale také se měří parametry vstupu.

Tabulka 4.1: Použité měřicí přístroje pro měření DC/DC měničů

Označení	Výrobce	Výrobní nebo inventární číslo	Použití
34401	Agilent	i.č. 50000008650	Voltmetr
2000	KEITHLEY	i.č. 023953 (454 312/79)	Ampérmetr
M1T330	METRA Blansko	v.č. 4388005	Voltmetr
RE330F	RANGE	v.č. 12050043	Ampérmetr
Odporová dekáda R33	ZIP	v.č. 00788	Zatěžovací odpor
PPS2116A	Hantex	i.č. 50000034467	Zdroj
DSO7020B	Agilent	i.č. 501315	Digitální osciloskop

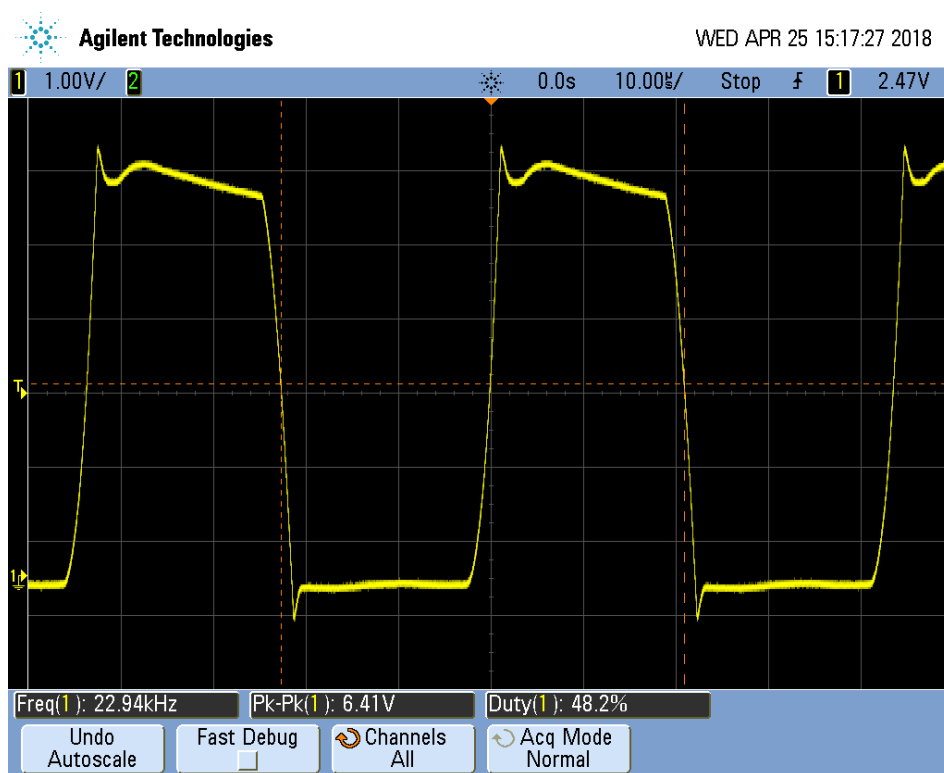


Obrázek 4.2: Měřicí schéma pro měření DC/DC měničů



Obrázek 4.3: Zatěžovací charakteristika měniče s LTC3108

Z výše uvedené zatěžovací charakteristiky vyplývá, že při vyšším odběru vypadnou oscilace oscilátoru, který budí autotransfornátor.



Obrázek 4.4: Průběh signálu na převodním transformátoru

#### 4.1.2 Srovnání naměřených dat s teoretickými

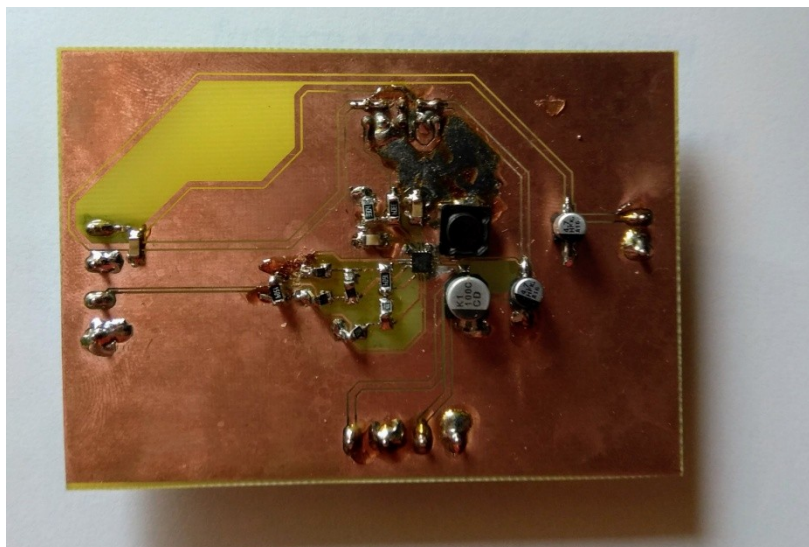
Tabulka 4.2: *Naměřené a katalogové údaje pro LTC3108*

Parametr	Naměřené	Katalogové
$U_{IN\ MIN}$ (mV)	25	20
$U_{OUT}$ (V)	3,317	$3,3 \pm 2 \%$
$U_{LDO}$ (V)	2,2	$2,2 \pm 3 \%$
$f$ (kHz)	23	50

Výstupní napětí sedí s napětím uvedeným v katalogu. Minimální vstupní napětím bylo změřeno o 5 mV větší, než udává výrobce. Kmitočet je skoro poloviční, než udává katalog.

#### 4.2 Vstupní DC/DC měnič pro zdroj ze světla s BQ25504

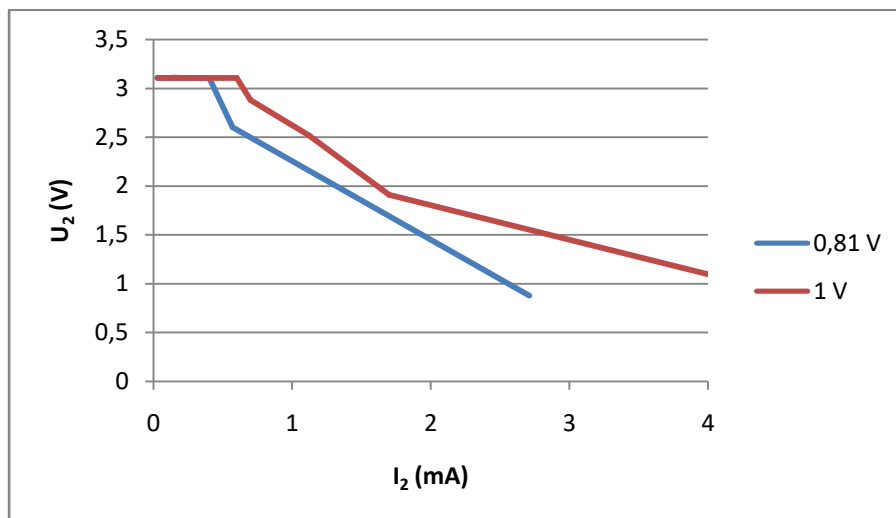
Při tvorbě DPS byla snaha dodržet doporučení výrobce na rozmístění součástí, s jediným rozdílem, že výrobce doporučuje použití dvouvrstvé DPS s předem definovanou impedancí. Byla použita jednovrstvá DPS s nosným materiálem FR4. Oproti LTC3108 nepotřebuje převodní transformátor. Využívá k akumulaci tlumivku o indukčnosti 22  $\mu$ H na feritovém jádře. Rozměry DPS jsou 90x65 mm.



Obrázek 4.5: *Fotografie vyrobeného DC/DC měniče s BQ25504*

#### 4.2.1 Měření parametrů

Měření parametrů měniče bylo totožné s měřením LTC3108. Použité měřicí schéma je zobrazeno na obrázku 4.2. Použité přístroje jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obrázek 4.6: Zatěžovací charakteristika DC/DC měniče s BQ25504

Výpadek napětí je způsobený poklesem vstupního napětí na pinech integrovaného obvodu pod 330 mV. Pokles je způsobený zamezeným odporem, který ovlivňuje charakteristiku laboratorního zdroje, protože udané napětí charakteristik je napětí zdroje naprázdno.

#### 4.2.2 Srovnání naměřených dat s teoretickými

Tabulka 4.3: Srovnání parametrů BQ25504

Parametr	Naměřené	Katalogové
$U_{IN\ MIN}$ (mV)	400	330
$U_{OUT}$ (V)	3,106	3,3 (navrhované)
$I_Q$ (nA)	200	<330

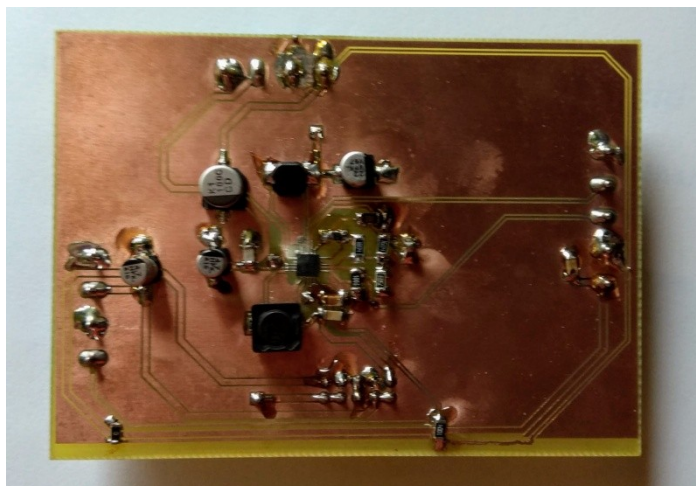
Z tabulky 4.3 je patrné, že parametry uvedené v katalogu se shodují a výpočet odporů pro nastavení výstupního napětí nebylo příliš přesné zaokrouhlováním hodnot do vybraných řad, ve kterých se vyrábí rezistory.

Na zdroji nebylo možné nastavit napětí 330 mV s minimálním vnitřním odporem. Nejbližší možná hodnota byla 400 mV, při kterých výstupní napětí dosáhlo tížené hodnoty. Hodnota lze vhodným nastavením snížit. Vše záleží na odporech děličů, dále napětí ovlivňuje hodnota skladovacího kondenzátoru.

### 4.3 Výstupní DC/DC měnič s BQ25570

Tento měnič je zajímavý tím, že obsahuje jak zvyšovač tak snižovač. Z těchto důvodů je nejvhodnější pro výstupní měnič. Potřebuje ke své činnosti dvě akumulární tlumivky, jedna je určena pro zvyšovač a má indukčnost  $22\ \mu\text{H}$ , druhá je určena pro snižovač a má indukčnost  $10\ \mu\text{H}$ . Obě akumulární tlumivky jsou na feritovém jádře.

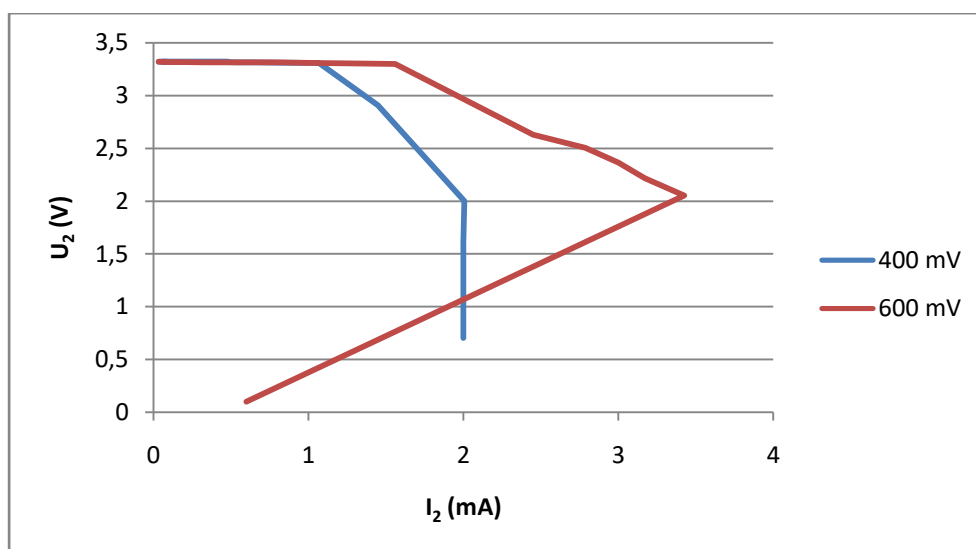
Rozměr DPS  $90 \times 65\ \text{mm}$  s nosným materiálem FR4. Oproti předchozím měničům obsahuje dvě drátové propojky. Opět byla snaha dodržet doporučení výrobce uvedených v příslušném katalogu.



Obrázek 4.7: Fotografie výstupního DC/DC měniče

#### 4.3.1 Měření parametrů

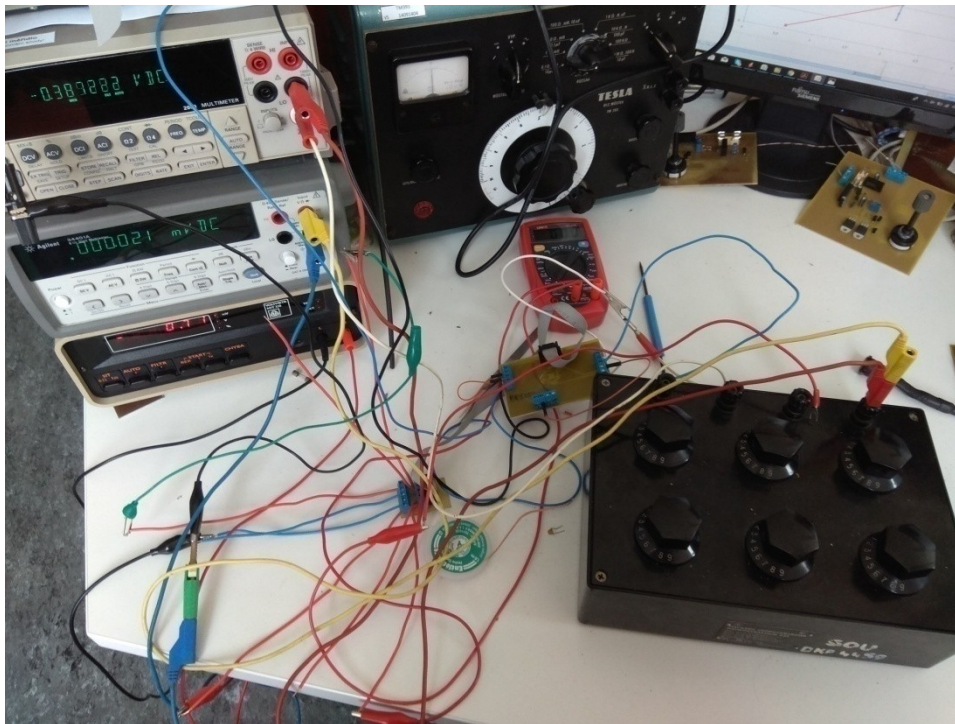
Měření parametrů je totožné z výše uvedenými měřeními.



Obrázek 4.8: Zatěžovací charakteristika měniče s BQ25570



Ze zatěžovací charakteristiky (obrázek 4.8 ) je patrné stejné omezení jako u BQ25504. Pokud klesne vstupní napětí pod cca 300 mV, není měnič schopen činnosti a od určitého bodu je aktivní proudové omezení. Napětí uvedené pro jednotlivé charakteristiky je napětí zdroje naprázdno.



Obrázek 4.9: Ukázka měření zatěžovací charakteristiky BQ25570

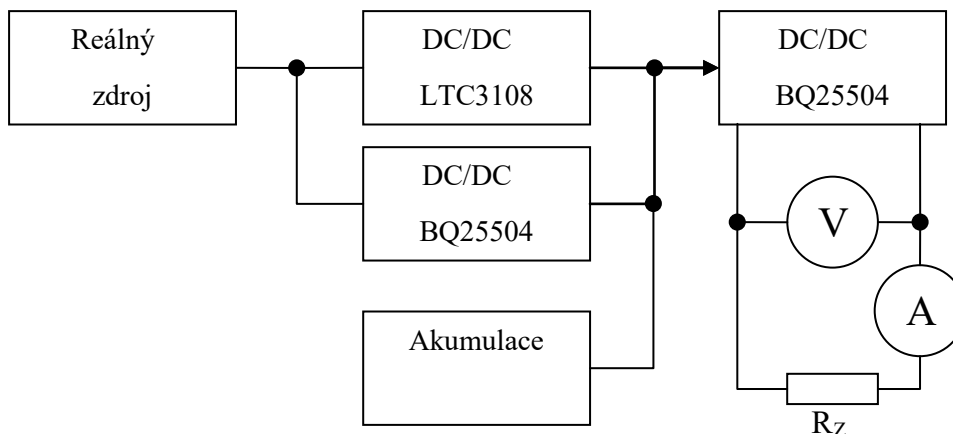
#### 4.3.2 Srovnání naměřených dat s teoretickými

Tabulka 4.4: Srovnání parametrů BQ25570

Parametr	Naměřené	Katalogové
$U_{IN\ MIN}$ (mV)	400	330
$U_{OUT}$ (V)	3,3196	3,3 (navrhované)
$I_Q$ (nA)	300	<480

Opět rozdíl mezi katalogovými údaji a naměřenými není příliš velký. Nastavení výstupního napětí je přesnější jak u BQ25504, chyba je cca 6 %, většina technologií se spokojí s tolerancí 5 % až 10 %. Zpřesnění lze dosáhnout vhodnějším výběrem nastavujících rezistorů.

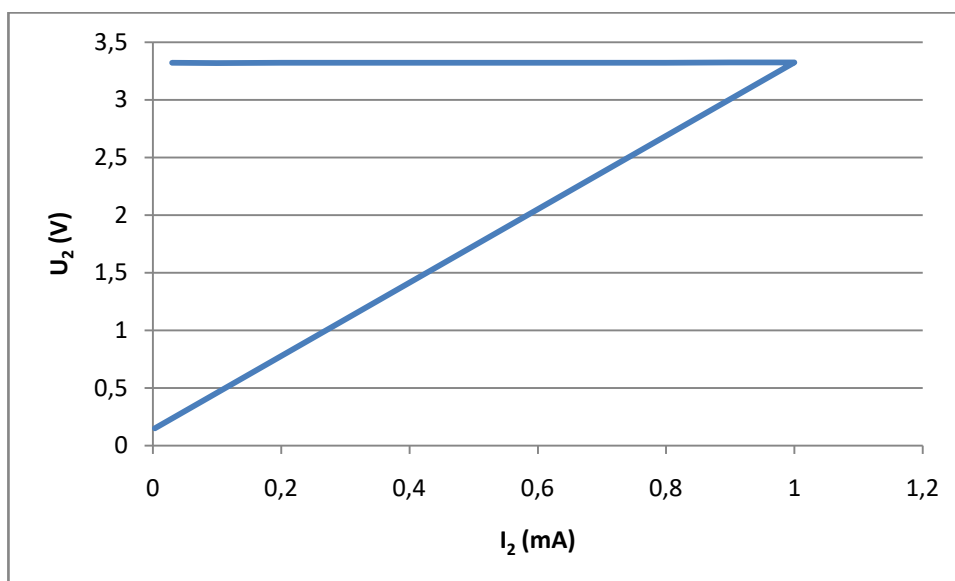
#### 4.4 Měření vybrané topologie bez akumulace



Obrázek 4.10: *Blokové měřicí schéma celé topologie*

Každý DC/DC má předřazený různý odpor, aby se simulovalo různé možnosti zatížených různých zdrojů. K výstupu vstupního měniče byl zařazen ochranný odpor  $47\ \Omega$ , aby nedošlo ke zničení jednotlivých měničů.

Byla změřena zatěžovací charakteristika. Použité přístroje jsou stejné jako v předchozích měřeních (viz tabulka 4.1).



Obrázek 4.11: *Zatěžovací charakteristika zvolené topologie*



## Závěr

V bakalářské práci je navržena celá metodika měření a analýz jednotlivých komponentů a celého celku, které budou použity jako dílčí základy pro řešení projektu OP-PIK získávání energie z média nebo prostředí bez použití napájení bateriemi při měření energetických médií pro metrologické použití v síti SMART GRID ve spolupráci s firmou CODEA spol. s r. o. Shrnuje dosažené výsledky realizovaného zařízení se zdrojem bez použití baterie.

V rámci práce byly změřeny zatěžovací charakteristiky vybraných článků, které přeměňují určitou formu energie na energii elektrickou. Na základě analýzy a měřených výsledků bylo zjištěno, že elektrická energie získaná z TEG článků při malých teplotních rozdílech (předpokládaný teplotní rozdíl je 2 K) je dostatečná pro napájení vývojového řídicího modulu s úsporným MCU od Texas Instruments. Zvolené a analyzované solární články o rozměrech 15x30mm naopak nedodávají dostatečnou energii pro napájení řídicího modulu. Jejich energie je dostatečná pro napájení displeje s kapalnými krystaly (LCD). V rámci projektu bude analyzována vhodnější velikost a provedení článků, aby dodávaná energie se také podílela na napájení řídicího obvodu.

Měřením vývojových funkčních modulů reprezentující v topologii blok „zátěž“, především vývojové řídicí desky s MCU, bylo zjištěno, že při maximálním výpočetním zatížení MCU je maximální změřená špička proudu rovna 1 mA, při napájení 3,3 V. V rámci projektu není předpokládáno trvalé maximální vytížení MCU. Bylo vybráno právě takové MCU, které je schopno připojovat a odpojovat jednotlivé periferie, a tím snížit svou spotřebu. Nejúspornější pracovní mód měl spotřebu pod 0,1 mA, pokud byl „uspán“ a fungoval jen obvod RTC byl změřený odběr pouhých 300 nA, po vypnutí RTC spící MCU odebíral necelých 30 nA.

V práci jsou uvedeny vhodné DC/DC měniče, jejich analýza i měření na vyrobených funkčních vzorcích. Hodnoty jsou omezeny použitím reálných zdrojů, tedy pokud napětí na vstupu pokleslo pod přijatelnou mez, obvod přestal fungovat. Dále se na trhu s těmito obvody objevila novinka, která je schopna s podobným převodním transformátorem jako LTC3108 pracovat již od 5 mV, a bude předmětem budoucích analýz v rámci výzkumného projektu. Také AC/DC měniče budou v rámci projektu analyzovány po vytvoření vhodné strojní součásti s piezoelektrikem.

Původní navržená topologie napájecího systému se podle naměřených a analyzovaných hodnot ukazuje jako vhodná. Více připojených zdrojů, které se budou lišit podle metrologického měření média, zvyšuje rychlost najetí celého systému do provozního režimu měření parametrů média. Jak již bylo uvedeno, solární články se hodí pro napájení LCD, pokud by vyrobily více energie než je schopen LCD spotřebovat. Články by se měly touto přebytečnou energií podílet na napájení řídicí části. Pro napájení MCU bohatě vystačuje DC/DC měnič s LTC3108 a TEG článkem, protože maximální změřený proud dodávaný z TEG článku a z měniče s LTC3108 byl do 0,7 mA a špičkový odběr MCU byl 1 mA, který je schopen pokrýt blok akumulace se superkapacitorem.

## Použitá literatura

- [1] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 320 s. ISBN 80-730-0190-X.
- [2] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008, 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4. Dostupné také z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/Mechanika%20tekutin.pdf>
- [3] WOJNAR, Jiří. *Základy elektrotechniky*. Brno: Tribun EU, 2012, 283 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-263-0261-2.
- [4] HÄBERLE, Heinz O. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. Praha: Europa-Sobotáles, 2003. ISBN 80-867-0604-4.
- [5] Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [6] Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [7] Thomsonův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/912-thomsonuv-jev>
- [8] DŘÍNEK, Ing. Milan. Peltierovy termobaterie. In: *Vývoj HW: Profesionální elektronika* [online]. Praha, 16. 12. 1999 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>
- [9] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996. ISBN 80-860-5602-3.
- [10] MALLAT, Ing. Jaroslav a Ing. Jiří KROFTA. *Stabilizované napájecí zdroje pro elektroniku*. Praha: SNTL a ALFA, 1985, 248 s. DT 621.311.6:621.3.049.77.
- [11] HUMLHANS, Jan. *Nábojové pumpy: funkce, přehled a použití*. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 192 s. ISBN 80-730-0046-6.
- [12] SUPERKAPACITORY. In: *ECOM* [online]. České Meziříčí: ECOM, ©2017 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>
- [13] STACH, Jan. *Československé integrované obvody: vlastnosti a použití*. Praha: SNTL, 1975, 336 s. Řada elektrotechnické literatury. DT 621.37/.39.049-181.4.
- [14] DOSTÁL, Ing. Jiří. *Operační zesilovače*. Praha: STNL, 1981, 480 s. DT 681.58 3.
- [15] LTC3108 datasheet. In: *Analog* [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3108fc.pdf>

- [16] BQ25504 datasheet. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>
- [17] BQ25570 datasheet. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf>
- [18] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0181-0.

## Seznam příloh

Příloha A:	Zatěžovací charakteristiky TEG článků .....	i
Příloha B:	Schéma vstupního DC/DC měniče s LTC3108.....	iii
Příloha C:	Schéma zapojení DC/DC měniče s BQ25504 .....	iv
Příloha D:	Schéma zapojení DC/DC měnič BQ25570 .....	v

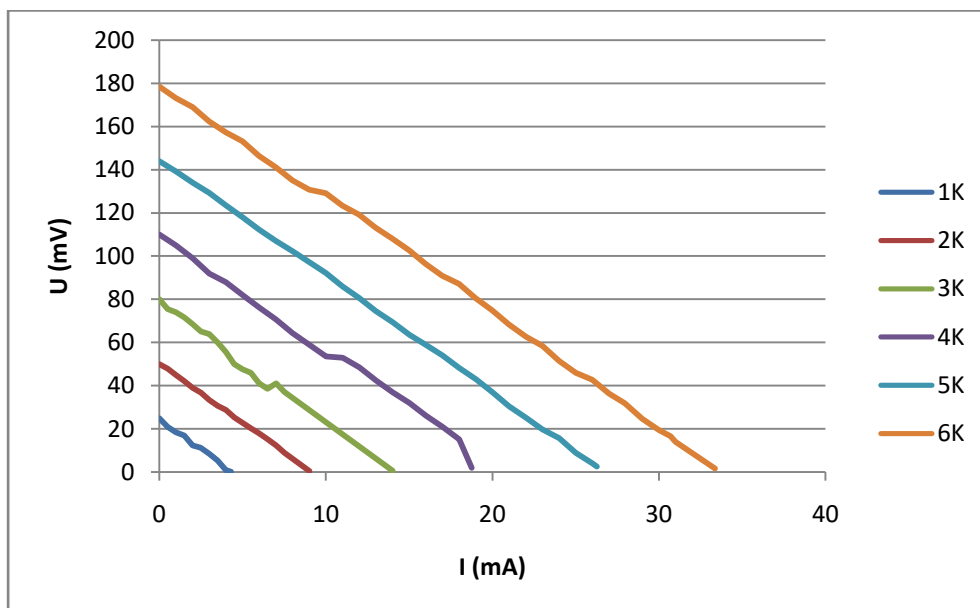
## Seznam příloh na CD

V adresáři „EAGLE“ jsou uvedeny potřebné soubory jednotlivých DPS.

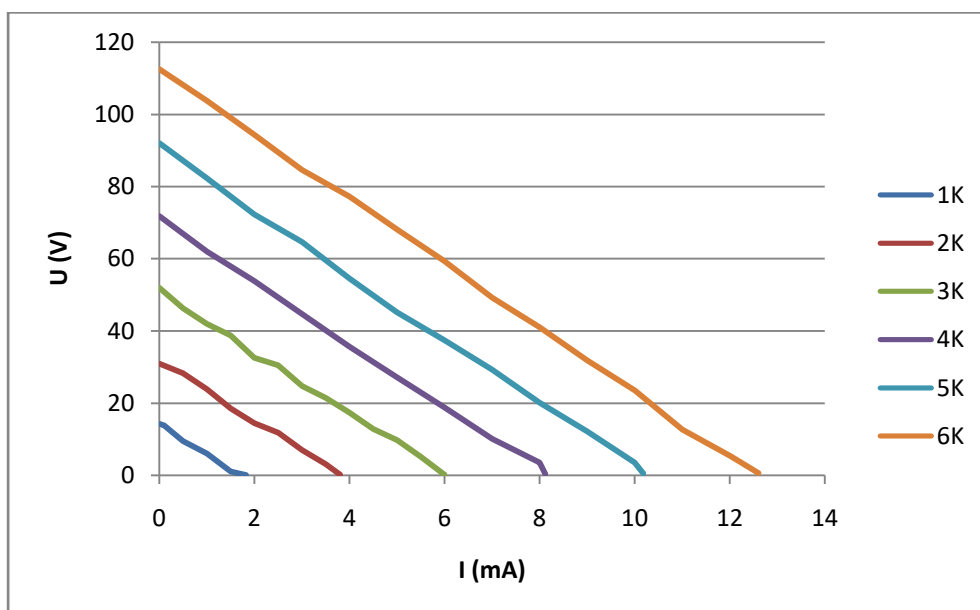
V adresáři „MERENI“ je uvedena kopie programu pro měření TEG(C) článků.

V adresáři „DATASHEET“ jsou uvedeny datasheety použité při návrhu.

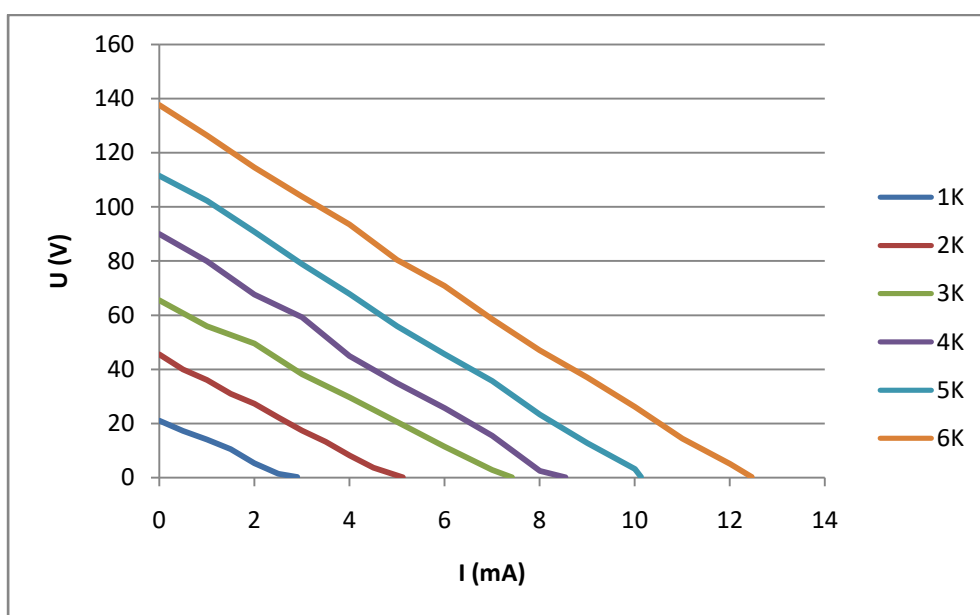
Příloha A:     *Zatěžovací charakteristiky TEG článků*



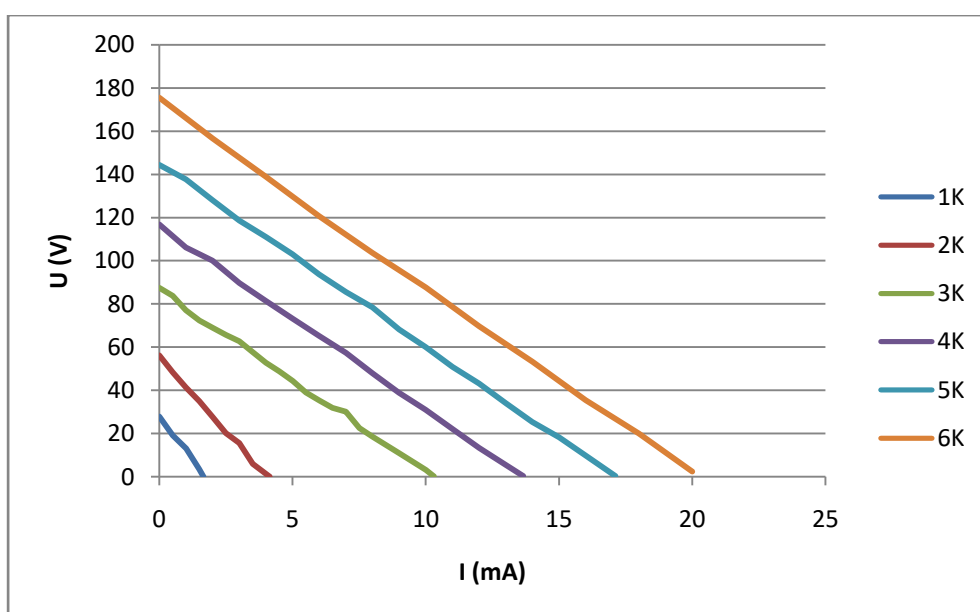
*Obr. 1 – Zatěžovací charakteristiky prvního TEG článku*



*Obr. 2 – Zatěžovací charakteristiky druhého TEG článku*

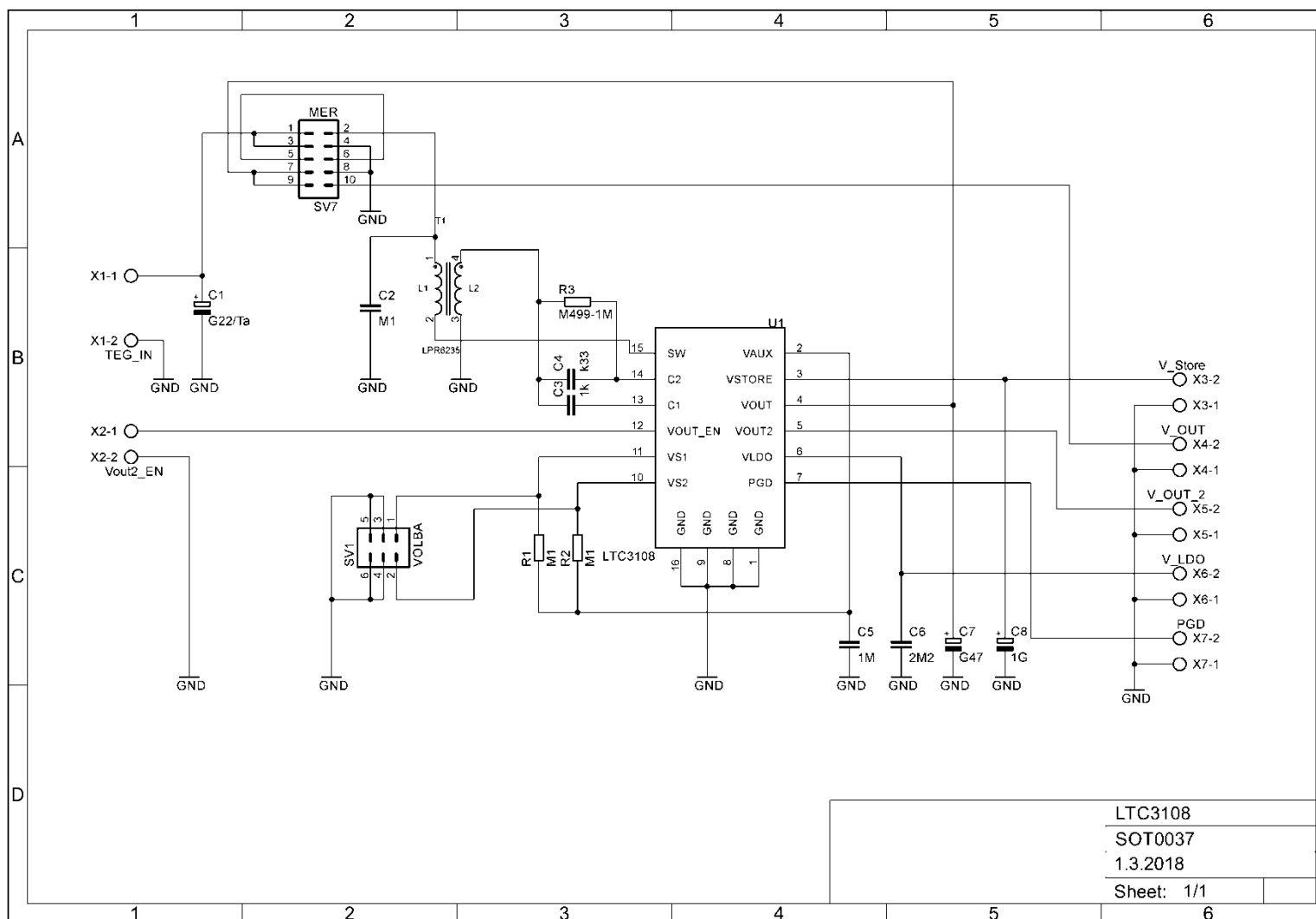


Obr. 3 – Zatěžovací charakteristiky třetího TEG článku



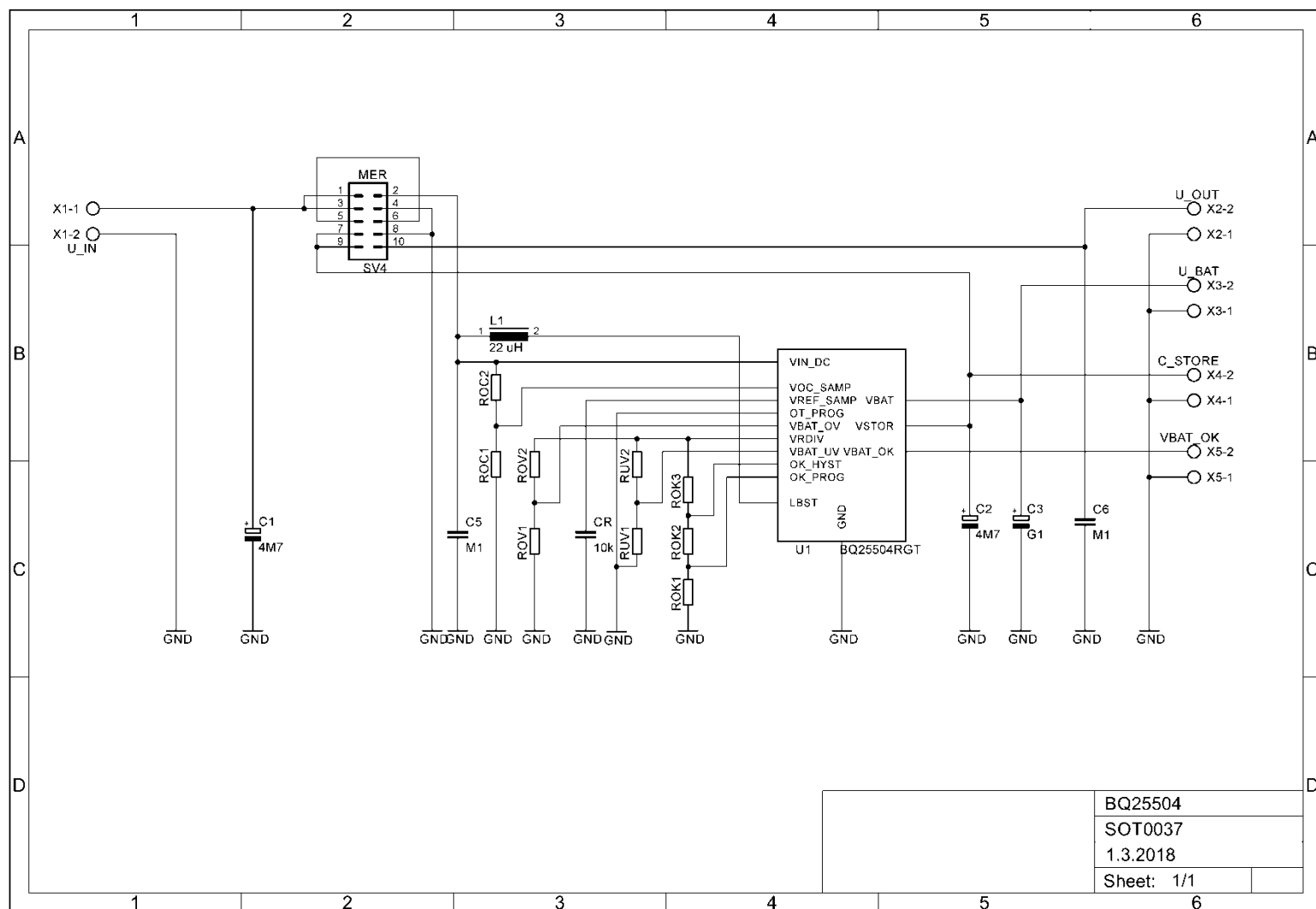
Obr. 4 – Zatěžovací charakteristika čtvrtého TEG článku

Příloha B: *Schéma vstupního DC/DC měniče s LTC3108*





Příloha C: *Schéma zapojení DC/DC měniče s BQ25504*



Příloha D: Schéma zapojení DC/DC měnič BQ25570

